

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE INVENTARIOS DE
REPUESTOS PARA COSECHADORAS EN UN INGENIO AZUCARERO DEL
VALLE DEL CAUCA**

ANDRÉS FELIPE INSUASTY PEÑA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE OPERACIONES Y SISTEMAS
INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2014**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE INVENTARIOS DE
REPUESTOS PARA COSECHADORAS EN UN INGENIO AZUCARERO DEL
VALLE DEL CAUCA**

ANDRÉS FELIPE INSUASTY PEÑA

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Industrial**

**Director
HERNÁN SOTO GARCÍA
Magister en Ingeniería Industrial**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE OPERACIONES Y SISTEMAS
INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2014**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Industrial

**Hernán Soto García
Director**

**Alejandro Silva
Jurado**

**Carlos Alberto Escobar
Jurado**

SANTIAGO DE CALI, OCTUBRE 28 DE 2014

Culminar esta tesis significa el logro de una anhelada meta que no hubiera sido posible sin la ayuda de Dios padre todo poderoso y de la Santísima Virgen María, quienes se llevan la dedicatoria principal de esta obra. A ellos por brindarme tranquilidad en los días de preocupación, por acompañarme incondicionalmente, por caminar por mí cuando yo no tenía ánimos y por regalarme en este mundo a las personas que son el motor de mi existencia mis padres, mis hermanos y toda mi familia.

A mis padres Alirio y María Elena por apoyarme con sus palabras y sus actos en cada momento, a mi novia por el amor que me brinda a diario, por caminar conmigo en todo este tiempo, por confiar en mí y por estar siempre a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a toda mi familia por el apoyo y por brindarme la oportunidad de estudiar esta carrera, a mi novia por su constancia y sacrificio en toda esta etapa de mi vida.

Tambien al profesor Hernán Soto García, director de este trabajo de grado, por su apoyo, y por ayudarme.

Muchas gracias

	CONTENIDO	
RESUMEN		12
INTRODUCCIÓN		15
1. ANTECEDENTES		17
1.1 CLASIFICACIÓN DE INVENTARIOS		18
1.2 SISTEMAS DE PRONÓSTICO		20
1.3 SISTEMAS DE CONTROL		22
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN		24
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA		24
3. JUSTIFICACIÓN		26
3.1 EMPRESA		26
3.2 RECURSO HUMANO		27
3.3 JUNTA DIRECTIVA		27
3.4 ESTUDIANTE		27
4. OBJETIVOS		28
4.1 OBJETIVO GENERAL		28
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS		28
5. MARCO REFERENCIAL		29
5.1. MARCO TEÓRICO		29
5.1.1.Técnicas de clasificación de inventarios.		27

5.1.1.1. Clasificación ABC.	29
5.1.2. Técnica multicriterio AHP.	30
5.2. SISTEMAS DE PRONÓSTICOS DE DEMANDA	31
5.2.1. Indicadores de Eficiencia del pronóstico.	32
5.2.2. Promedio móvil.	33
5.2.3. Suavización exponencial simple.	33
5.2.4. Suavización exponencial doble.	33
5.2.5. Método de Croston..	34
5.2.6. Errores Suavizados y Señales de Rastreo.	36
5.3. SISTEMAS DE CONTROL DE INVENTARIO	37
5.3.1. Sistema de revisión continuo	38
5.3.2. Sistema de revisión periódica	38
5.3.3. Costo Total Relevante	39
6. DESARROLLO PROPUESTA	40
6.1. CLASIFICACIÓN MULTICRITERIO AHP	41
6.1.1. Selección y calificación de Criterios.	42
6.1.2. Cálculo Peso de cada criterio – Vector Prioridad.	43
6.1.3. Análisis de consistencia.	46
6.1.4. Clasificación de repuestos por peso de cada criterio.	47
6.1.5. Clasificación de los repuestos por costo.	47
6.1.6. Clasificación de los repuestos por consumo.	48

6.1.7. Clasificación de los repuestos por Rotación de Inventario.	49
6.1.8. Clasificación de los repuestos por Criticidad.	50
6.1.9. Clasificación de los repuestos por Lead Time.	50
6.1.10. Peso total repuesto.	51
6.2. SISTEMAS DE PRONÓSTICOS	53
6.2.1. Patrón de demanda de los repuestos.	53
6.2.2. Pronósticos para repuestos con demanda no errática.	54
6.3. RESUMEN DE RESULTADOS	63
6.3.1. Pronósticos para repuestos con demanda errática	67
6.3.2. Señal de rastreo	68
7. SISTEMA DE CONTROL	73
7.1. Parámetros.	73
7.2. Sistema de Revisión Continuo (s, S).	74
7.2.1. Cálculo de Q	71
7.2.2. Cálculo valores S. s.	71
7.2.3. Cálculo costo total Relevante	72
7.2.4. Sistema de Revisión Periódico (R, S)	752
7.2.5. Cálculo de R	72
7.2.6. Cálculo de S	72
7.2.7. Cálculo Costo Total Relevante	73
7.2.8. Comparación costos de Políticas de Control	763
8. COMPARACIÓN SISTEMA DE CONTROL PROPUESTO Y ACTUAL	78

8.1. IMPACTO EN TIEMPOS DE INACTIVIDAD	78
8.2. IMPACTO EN COSTOS	79
8.2.1. Comparación de Niveles Máximos	79
8.3. COMPARACIÓN DEL VALOR DE Q	82
9. CONCLUSIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXOS	91

LISTA DE TABLAS

Anexo A. Tipos de Pronósticos y patrones de demanda
--

29

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Calificación por pares de criterios.	40
Cuadro 2. Resultado media geometrica para cada par de criterio	41
Cuadro 3. Matriz de comparación de criterios	42
Cuadro 4. Matriz de normalizada y vector de prioridad.	42
Cuadro 5. Suma ponderada	44
Cuadro 6. División Suma Ponderada con Vector Prioridad	44
Cuadro 7. Clasificación de los repuestos por Costo	45
Cuadro 8. Clasificación de los repuestos por Consumo mensual	46
Cuadro 9. Clasificación de los repuestos por Rotación de inventario	47
Cuadro 10. Clasificación de los repuestos por criticidad	47
Cuadro 11. Clasificación de los repuestos por lead time	48
Cuadro 12. Clasificación de los repuestos por peso total	48
Cuadro 13. Sistema de Promedio Móvil–Repuesto No. 11	52
Cuadro 14. Resultados Iteraciones de n	54
Cuadro 15. Sist de Suavización Exponencial simple Repuesto No. 11	55
Cuadro 16 .Sist de Suavización Exponencial doble Repuesto No. 11	59
Cuadro 17 Comparación Indicadores de Pronósticos, Repuesto 11	61
Cuadro 18. Calculo Señal de Rastreo	64

Cuadro 19. Contadores de Inicialización – Croston para repuesto No. 1.	66
Cuadro 20 Métodos de Croston – Repuesto No. 1	67
Cuadro 21. Calculo de la Señal de Rastreo para el Repuesto 1	70
Cuadro 22. Parámetros Sistema de Control – Repuestos 1	71
Cuadro 23. Comparación valores máximos sistema actual vs Propuesto	78
Cuadro 24. Comparación valores máximos sobre estimados	79
Cuadro 25. Comparacion valores de Q sistema actual vs propuesto	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Propuesta Metodológica.	39
Figura 2. Importancia de cada criterio	43
Figura 3. Patrón de demanda Ítems A..	51
Figura 4. Consumo y pronóstico promedio móvil para repuesto No. 11.	54
Figura 5. Consumo y suavización exponencial simple - repuesto No. 11.	57
Figura 6. Consumo y suavización exponencial Doble - repuesto No. 11	61
Figura 7. Resumen Resultados Pronósticos	65
Figura 8. Consumo y Método de Croston - repuesto No. 1	69
Figura 9. Comparación de los ítems controlados – Sistema Actual	76
Figura 10. Comparación valores máximos sobre estimados	80

RESUMEN

La investigación se realizó en la industria azucarera del Valle del Cauca. Se identificó y clasificó características de repuestos de máquinas cosechadoras, y se desarrolló un sistema de pronóstico y control de inventarios, además se utilizó información obtenida del ERP que maneja la empresa y de las personas que están en contacto a diario con el proceso, y se utilizaron técnicas como un método de clasificación multicriterio de inventarios, sistema de pronóstico y control de inventarios. Se validó el impacto de tiempos de inactividad de máquinas cosechadoras encontrando el 55% de ítems controlados clase C. Sólo se controla el 25% de ítems clase A, dejando por fuera un 75% de repuestos críticos los cuales son los que pueden generar paradas de maquina. En la clasificación de ítems, la Criticidad y el Lead Time obtuvieron valores de 54% y 20% respectivamente, siendo considerados los criterios con mayor importancia. El método de pronóstico que presentó mejores resultados en los repuestos con demanda no errática fue la suavización exponencial doble, dio menores errores de pronóstico, en 81% de los repuestos y para los repuestos con demanda errática fue el método de croston.

Palabras claves: técnica multicriterio, la criticidad, lead time, maquinas cosechadoras, caña de azúcar.

INTRODUCCIÓN

Uno de los sectores industriales más importantes en el Valle del Cauca es el conformado por los ingenios azucareros, los cuales se han caracterizado por ser compañías sólidas, con grandes estándares de gestión y mejoramiento continuo, que buscan constantemente la plena satisfacción de sus clientes.

En este tipo de organizaciones la productividad y competitividad depende directamente del proceso de cosecha, que actualmente, se ha venido mecanizando y hace uso de máquinas agrícolas para el corte y levante de caña. Dichas cosechadoras representan el activo más importante de la organización dado que desempeñan una de las funciones claves para la productividad y crecimiento de la empresa.

Actualmente, el problema que se está generando dentro de los ingenios azucareros, consiste en que las cosechadoras de caña están teniendo un alto tiempo de inactividad en el taller agrícola por falta de repuestos oportunos en el momento de las reparaciones o mantenimientos. Pero a su vez, el inventario de repuestos de cosechadoras en el taller agrícola es el más alto, representa el 40% de todo el inventario y tiene una tendencia creciente a lo largo del tiempo.

Esta disyuntiva de altos costos de mantenimiento de inventario y altos costos de escasez por demanda insatisfecha será abordada en el presente trabajo, en donde se propone un sistema de control de inventarios de repuestos, que garantice la disponibilidad oportuna de los mismos en el momento de la reparación, reduciendo así los costos de mantenimiento de inventario y los altos tiempos de inactividad de las cosechadoras.

La propuesta que se plantea inicia con un método multicriterio para la clasificación de inventarios, que busca categorizar las diferentes referencias de repuestos de acuerdo a criterios importantes como la criticidad, el lead time, el costo, la rotación, entre otros. Con el fin de identificar los repuestos críticos que se deben controlar y que tienen un mayor impacto en los tiempos de inactividad de las cosechadoras.

Después de la clasificación multicriterio, se toma información histórica del comportamiento de los repuestos y se analiza la demanda de cada SKU, para luego seleccionar e implementar el modelo de pronósticos más adecuado para estimar la demanda futura. La función del sistema de pronóstico es predecir el consumo de los repuestos con el fin de planear las compras y garantizar inventario oportuno.

Por último, se utiliza la información del sistema de pronóstico como entrada para implementar un sistema de control de inventarios, que permita garantizar la oportuna reposición de las existencias y estimar las cantidades óptimas de compra, incurriendo en el mínimo costo total relevante.

El desarrollo de la propuesta se validará con un caso de estudio construido con datos reales de un ingenio azucarero, cuyo nombre no será revelado por cuestiones de confidencialidad.

1. ANTECEDENTES

El control de inventarios ha sido un tema ampliamente tratado en la literatura, ya que “en el entorno actual de los negocios, las organizaciones deben mantener un equilibrio adecuado entre los altos costos de inventario y los críticos problemas de desabastecimiento. Pues si bien es cierto que el servicio al cliente no es un factor principal para atraer nuevos compradores, si es con frecuencia una de las principales razones para perderlos”¹.

Controlar y planificar los inventarios se ha convertido en una de las principales necesidades de las compañías de manufactura en años recientes. Según Muñoz (2009), “una de las principales razones por las que este tema recibe principal atención, obedece a que el costo de los inventarios en muchas empresas representa un porcentaje alto del capital invertido (por lo general entre 20% y 40%), por lo que una reducción de los inventarios es una estrategia inmediata para reducir los costos en la empresa”.² En ese mismo sentido, De la Fuente (2008) expresa: “En la gestión de inventarios, hay que buscar un punto de equilibrio entre dos circunstancias opuestas: Cuanto mayor sea el nivel de stocks del que se disponga, mejor será el servicio que se puede ofrecer. Pero el inconveniente está en que mantener un nivel de stock elevado, implica un gran capital inmovilizado y altos costos de mantenimiento. Si el nivel de stocks que se mantiene es bajo, el servicio que se puede ofrecer será pequeño, pero habrá menos capital inmovilizado y por lo tanto la situación financiera de la empresa será mejor.”³

La importancia de la gestión eficiente de los inventarios ha traído consigo, un crecimiento en la aplicación de métodos y técnicas para administrarlos correctamente.

¹WU CHU Ching, SHUH LIANG Gin, TSENG LIAO Chien. Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification. Computers & Industrial Engineering. Taiwan. 55 2008 p. 841–851.

² MUÑOZ, David. Administración de operaciones. Enfoque de administración de procesos de negocios.[en línea] books.google.com [consultado 3 de agosto de 2012] Disponible en Internet: http://books.google.com.co/books?id=edZx_26yf64C&pg=PA154&lpg=PA154&dq=planeacion+inventario&source=bl&ots=ZEYyMJllkr&sig=FL_Qxs_4uiqBmpUY2dFd3wAOiOc&hl=es&sa=X&ei=pNtQUPDLEYKo8gS4r4C4AQ&ved=0CEAQ6AEwAw#v=onepage&q=planeacion%20inventario&f=false consultado 3 de agosto de 2012

³ DE LA FUENTE, David. Ingeniería de organización en la empresa: Dirección de operaciones.en línea Disponible [en línea] books.google. [consultado 12 de septiembre de 2012.] Disponible en Internet http://books.google.com.co/books?id=wvkk787HzuUC&pg=PA114&lpg=PA114&dq=gestion+inventarios&source=bl&ots=2WC_aKmnY&sig=0O6x4fS62tNLlxzrdcbXg7aDAe4&hl=es&sa=X&ei=TIRRLigCpSK9ATP34HIBQ&ved=0CC8Q6AEwAA#v=onepage&q=gestion%20inventarios&f=false

Por lo anterior, en el presente capítulo se expondrán investigaciones importantes realizadas sobre el control de inventarios, especialmente de repuestos. Se iniciará con aquellas investigaciones que tratan sobre el problema de la clasificación de los inventarios. Se continuará con aquellos autores que realizaron aportes sobre sistemas de pronósticos, profundizando en aquellos estudios que se enfocan en las proyecciones de repuestos. Finalmente, se presentarán aportes al problema control de inventario.

1.1 CLASIFICACIÓN DE INVENTARIOS

En la Administración de Inventarios, es de vital importancia realizar una correcta clasificación de estos, ya que cada artículo o producto tiene características diferentes que se deben tener en cuenta a la hora de tratarlos, lo que hace que sea inapropiado y poco práctico manejarlos homogéneamente.

La complejidad del problema de clasificación de inventarios, radica en que comúnmente dentro de las organizaciones, se manejan gran cantidad de referencias, lo que implica dedicar bastante tiempo a este tema y por lo general el día a día de los trabajadores relacionados con los inventarios, no les permite tomar el tiempo necesario para una correcta clasificación. Además no cuentan con el conocimiento de las herramientas y técnicas requeridas para dicha clasificación.

La técnica más utilizada en aplicaciones industriales para la clasificación de inventarios sigue siendo la clasificación ABC, según el principio de Pareto. Este análisis se basa en un criterio único, el costo de uso anual, que es simplemente el producto de uso anual y el valor en unidades monetarias. A pesar de que es muy sencillo y económicamente viable de aplicar este tipo de análisis, el método tiene la particularidad de que quienes lo utilizan ignoran algunos criterios importantes, tales como la criticidad de agotamiento, la tasa de obsolescencia, la escasez, la posibilidad de sustitución, y el tiempo de entrega⁴.

Para superar las limitaciones de los análisis de clasificación tradicional, muchos investigadores se concentraron en la incorporación de múltiples criterios para la clasificación, lo cual dio paso a una metodología llamada Clasificación multicriterio.

Uno de los primeros artículos sobre el tema fue publicado por Flores y Whybark⁵, quienes proporcionaron una metodología matricial bi-criterio para la clasificación de inventario. Sin embargo, este aporte es relativamente difícil de usar cuando tres o más criterios participan en la evaluación.

⁴CAKIR Ozan, S. CANBOLAT Mustafa. A web-based decision support system for multi-criteria inventory classification using fuzzy AHP methodology. Expert Systems with Applications. Canada. 35 2008.p. 1367–1378.

⁵FLORES B. E., WHYBARK, D. C.. Implementing multiple criteria ABC analysis. En:Journal of Operations Management, vol.7no.1–21987.p 79–85.

Cohen y Ernest⁶ implementaron una técnica de agrupamiento estadístico para clasificar los artículos con múltiples atributos, sin embargo, una gran cantidad de datos de inventario son necesarios para ejecutar esta técnica, se requieren sofisticados procedimientos estadísticos como el análisis factorial. Además, cada vez que se almacena un nuevo artículo de inventario en un almacén, el proceso de agrupamiento debe ser repetido y hay una posibilidad alta de que los elementos previamente clasificados puede terminar con diferentes clases.

Partovi y Burton⁷ por su parte, aplicaron el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la clasificación del inventario a fin de incluir tanto los criterios de evaluación cuantitativa y cualitativa. AHP ha sido elogiado por su facilidad de uso y su inclusión de las opiniones del grupo. Adicionalmente ha sido una de las técnicas más utilizadas al ofrecer óptimos resultados, cuando se utilizan varios criterios de decisión.

Cortes y Morales⁸ en su trabajo se basan en la técnica de clasificación AHP planteada por Partovi y Burton para la clasificación de repuestos en una empresa manufacturera. Los autores plantean de una forma clara y sencilla la aplicabilidad de la técnica AHP para la clasificación de inventarios, obteniendo resultados satisfactorios al utilizar varios criterios de decisión.

Recientemente, Ramanathan⁹ propuso un estudio llamado “Modelo de Optimización Lineal Ponderada con Múltiples Criterios de Clasificación de Inventario ABC”. El modelo propuesto, en lo sucesivo denominado R-modelo, puede generar automáticamente un conjunto de pesos para cada criterio y asignar una puntuación normalizada para este criterio. Los resultados que el estudio arroja es que, a pesar de sus muchas ventajas, el modelo de Ramanathan (R-model) podría llevar a una situación en la que indebidamente un elemento con un valor alto en un criterio clasifique un artículo como clase A.

Para mejorar las falencias del R-model, PengZhou Y Liwei Fan¹⁰, proponen un modelo similar que utiliza dos conjuntos de pesos que son más favorables y menos favorables para cada elemento, con esto se reduce el error de que una clasificación alta en un criterio sitúe a un elemento en una clasificación A.

⁶COHEN M. A., ERNST, R. Multi-item classification and generic inventory stock control policies. En: Production and Inventory Management Journal, 1988. vol.29 no.3,p. 6–8.

⁷PARTOVI F. Y., BURTON J.Using the analytic hierarchy process for ABC analysis.En: International Journal of Operations&Production Management, . 1993. Vol.13.no.9, p.29–44.

⁸CORTÉS B. E, MORALES L. V. DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE INVENTARIOS DE REPUESTOS EN UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE LA CIUDAD DE CALI. Tesis de grado para optar por el título de ingeniería industrial. Facultad de ingenierías. Universidad del Valle.p.50

⁹RAMANATHAN Ramakrishnan.ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization.en: Computers & Operations Research. 2006 Vol.33 p.695–700

¹⁰ZHOUPeng, FAN Liwei. A note on multi-criteria ABC inventory classification using weighted linear optimization. En: European Journal of Operational Research. 2007 vol. 182 p.1488–1491.

En los estudio de Cakir, Canbolat¹¹ y WuChu,*et al.*,¹², se proponen sistemas de clasificación de inventario basados en el proceso de jerarquía analítica (AHP), pero aplicando conceptos fuzzy, lo cual se convierte en una herramienta de uso común para los problemas de decisión multicriterio. Se integran conceptos difusos con los datos de inventario de bienes y se diseña un sistema de soporte de decisiones ayudando a una razonable clasificación.

Por último, Subramanian y Ramanathan¹³ realizaron un resumen de toda la revisión de la literatura existente en las aplicaciones de la AHP en la gestión de operaciones, exponiendo el punto de vista de los autores y la brecha que existe con la aplicabilidad. Como conclusión estos autores indicaron que la AHP es una de las mejores técnicas para la clasificación de inventarios y a pesar de las diferentes investigaciones que plantean otros métodos, la facilidad y aplicabilidad de la AHP sigue siendo superior.

1.2 SISTEMAS DE PRONÓSTICO

En los sistemas de pronósticos el paso inicial en la definición de una política óptima de inventarios, consiste en prever el comportamiento de la demanda que se debe satisfacer. Esto significa identificar el modelo de pronósticos que arroje predicciones futuras más acertadas y que se ajuste mejor al patrón de demanda del inventario estudiado.

“Para patrones de demanda con movimientos rápidos, tradicionalmente se utilizan las suavizaciones exponenciales como sistema de pronósticos. Pero, para inventarios con movimiento lento, erráticos, tales como los repuestos, la técnica más utilizada para las proyecciones es el método de Croston CR”¹⁴.

Croston¹⁵ desarrolló un sistema de pronóstico para ítem con demanda errática en donde, tuvo en cuenta tanto el tamaño de la demanda como el tiempo entre llegadas para realizar las proyecciones. En particular, sugirió el uso de la

¹¹CAKIR Ozan, S. CANBOLAT Mustafa. A web-based decision support system for multi-criteria inventory classification using fuzzy AHP methodology. Expert .En :Systems with Applications. Canada. 2008Vol:35 p. 1367–1378.

¹²WU CHU Ching, SHUH LIANG Gin, TSENG LIAO Chien. Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification. EN:Computers & Industrial Engineering. 2008 Taiwan. Vol.55 p.841–851.

¹³SUBRAMANIAN Nachiappan, RAMANATHAN Ramakrishnan. A review of applications of Analytic Hierarchy EN:Process in operations management.Int. J. Production Economics. China. 2012 vol. 138 p.215–241.

¹⁴SNYDER Ralph. Forecasting sales of slow and fast moving inventories. European En:Journal of Operational Research. 2002 vol.140 p.684–699.

¹⁵CROSTON J. D. Forecasting and stock control for intermittent demands. En:Operational Research Quarterly, 1972. vol.23, p.289–303.

suavización exponencial simple (SES) por separado para predecir el intervalo entre la ocurrencia de la demanda así como la cuantía de la demanda. “Este método se utiliza ampliamente en la industria y se ha incorporado en varios paquetes de software”¹⁶.

Las bondades de este método han sido ampliamente estudiadas dentro de la literatura, autores como Willemain *et al.*,¹⁷ en su artículo “Una evaluación comparativa del método de Croston” compararon el método de CR con la suavización exponencial para los repuestos y se llegó a la conclusión de que el método CR es fuertemente superior, aunque los resultados con datos reales en algunos casos muestran un beneficio más modesto.

Johnston y Boylan¹⁸ obtuvieron resultados similares, pero además mostraron que el método CR es siempre mejor que la suavización exponencial cuando el promedio de tiempo entre llegadas de la demanda es mayor de 1,25 intervalos de revisión.

Por su parte, Sani y Kingsman¹⁹ compararon diferentes métodos de control de inventario y pronóstico de algunas series largas de datos con baja demanda de bienes, en los almacenes de piezas de recambio en el Reino Unido y llegaron a la conclusión basada en el nivel de costos y servicio, que el mejor método de predicción es la media móvil seguido por el método CR.

En cuanto a estudios relacionados con las piezas de repuestos, Ghobbar y Friend²⁰ compararon diferentes métodos de predicción usando datos reales de repuestos de aviones que se usan para el mantenimiento de un operador de líneas aéreas. Los datos son de naturaleza esporádica y revelan que la media móvil, el método de Holt y el método de CR son superiores a otros métodos tales como el suavizado exponencial.

A pesar de las bondades anteriormente expuestas, ha habido un gran interés por diferentes autores para mejorar el método de Croston, y se han desarrollado estudios como el presentado por Snyder²¹ en donde plantean una técnica llamada bootstrap paramétrico, el cual es una versión mejorada del enfoque de Croston y su uso en el control de inventarios, en ésta se hace hincapié en la necesidad de

¹⁶Croston Op cit. p. 17.

¹⁷ WILLEMAIN T.R., SMART C.N., SHOCKOR J.H., DESAUTELS P.A., Forecasting intermittent demand in manufacturing: A comparative evaluation of Croston's method. International Journal of Forecasting 1994 vol.10, p. 529–538.

¹⁸ JOHNSTON F.R., BOYLAN, J.E., Forecasting intermittent demand: A comparative evaluation of Croston's method. en: International Journal of forecasting 1996. Vol.12, p. 297–298.

¹⁹ SANI, B., KINGSMAN, B.G., Selecting the best periodic inventory control and demand forecasting methods for low demand items. En: Journal of the Operational Research Society 1997. Vol. 48, p. 700–713.

²⁰ GHOBBAR, A.A., FRIEND, C.H., Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation: A predictive model. En: Computers and Operations Research 2003. vol30, p.2097–2114.

²¹ SNYDER, Op. Cit. p.538

especificar correctamente los modelos estadísticos para la generación de aproximaciones a las distribuciones de probabilidad de demanda del tiempo. La propuesta se comparó con el método de Croston y otros sistemas de pronósticos y presentó mejores resultados, pero requiere de cálculos más sofisticados y complejos.

Por último, Syntetos y Boylan²² proponen un nuevo método basado en el enfoque de Croston, el cual se probó con un caso de estudio que contiene datos de la industria de automóviles obteniendo mejores resultados. La propuesta muestra que el error medio no es fuertemente dependiente de la exactitud de los datos, por el contrario la raíz cuadrada del error es una buena medida de la precisión del pronóstico.

“A pesar de que algunas publicaciones anteriores y otras más recientes sostienen que el método de Croston ha sido mejorado, y han propuesto nuevas metodologías, este sigue siendo un tema de gran interés investigativo”. (Vidal).

1.3 SISTEMAS DE CONTROL

Una vez seleccionada la técnica de pronóstico, se procede a determinar el sistema de control que se utilizará para la gestión de inventarios, este sistema toma como datos de entrada los resultados obtenidos en las proyecciones y determina la frecuencia de las revisiones, cada cuanto se va a ordenar y el tamaño de lote.

Durante las últimas décadas, una serie de estudios de casos sobre control de inventario han aparecido en la literatura académica, sobre todo en aplicaciones de la electrónica, la química y las industrias de automoción. Una de las primeras publicaciones de este tipo fue realizada por Gelders y Looy²³, que presentan un resumen de las diferentes políticas de inventario, tanto para artículos de movimiento lento como para artículos de rápido movimiento en una planta petroquímica con cerca de 22.500 referencias. Dentro de las técnicas presentadas se encuentran las (S,s), (S,Q) y (R,S).

Vereecke y Verstraeten²⁴ describe un algoritmo para la implantación de un sistema de control de inventario informatizado para piezas de repuesto en una planta química, situada en Bélgica. Este algoritmo se basa en los sistemas de control de

²²SYNTETOS Aris, E. BOYLAN John. The accuracy of intermittent demand estimates. En: International Journal of Forecasting 2005.vol.21 p.303– 314.

²³GELDERSL.F., VAN LOOYP.M., An inventory policy for slow and fast movers in a petrochemical plant: a case study. En: Journal of the Operational Research Society 1978. vol.29 no.9, p.867–874.

²⁴VEREECKE A., VERSTRAETEN P., An inventory management model for an inventory consisting of lumpy items, slow movers and fast movers. En: International Journal of Production Economics 1994. Vol. 35 no.1-3, p. 379–389.

inventarios periódicos y continuos tradicionales, haciendo adaptaciones que mejoran la relación con los sistemas de pronósticos.

Más recientemente, Aroniset *al.*,²⁵ realizaron una investigación denominada “Control de inventario de piezas de repuesto utilizando un enfoque bayesiano” en donde desarrollan una metodología bayesiana para obtener predicciones más precisas para la demanda de piezas de repuesto de equipos electrónicos y luego aplicaron los resultados para obtener los valores correspondientes del parámetro S de la política de inventario (S - 1, S).

Por último, Cortes y Morales²⁶ realizaron una investigación llamada “diseño de un sistema de control de inventarios de repuestos en una empresa manufacturera de la ciudad de Cali” en donde desarrollaron un sistema de control de inventarios, que inicia con un análisis multicriterio AHP para la clasificación de los repuestos y estudiaron diferentes técnicas de pronósticos para identificar las que se adaptaban mejor a los patrones de demanda. Por último, con la información de los pronósticos, propusieron las políticas de inventarios que tenían mejores resultados frente al costo total relevante.

Kukreja y Schmidt²⁷ presenta el caso de una empresa de servicios públicos que tiene 29 plantas generadoras de energía en cinco estados americanos al sur-este de Estados Unidos. El inventario en estudio se compone de elementos de poco uso, pero costosos, con un patrón de demanda irregular. La política de control desarrollada propone un sistema de revisión de inventario continuo. Los resultados obtenidos amortiguan los costos de mantenimiento de inventarios con los costos de faltantes de productos, lo cual hacen que esta propuesta sea una buena alternativa cuando el movimiento de la demanda es irregular y el costo de los repuestos es alto.

En general los estudios que se encuentran en la literatura sobre los sistemas de control de inventarios, se basan en las técnicas de control tradicionales agregándoles conceptos y algoritmos que los hacen más sofisticados.

²⁵ ARONIS K. P., MAGOU I., DEKKER R. Tagaras, G..Inventory control of spare parts using a Bayesian approach: a case study. En: EuropeanJournal of OperationalResearch 2004 vol.154 no.3 p., 730–739.

²⁶ CORTÉS B. E, MORALES L. V. DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE INVENTARIOS DE REPUESTOS EN UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE LA CIUDAD DE CALI. Tesis de grado para optar por el título de ingeniería industrial. Facultad de ingenierías. Universidad del Valle.p50

²⁷ KUKREJA A., SCHMIDT C.P., A model for lumpy demand parts in a multi-location inventory system with transshipments. Computers and Operations Research 2005. Vol.32 no.8,p. 2059–2075.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El nivel de servicio y la satisfacción del cliente se han convertido en objetivos claves para toda organización que quiere mantenerse vigente en un entorno cada vez más competitivo y cambiante. Por lo cual, son una preocupación constante las decisiones sobre cómo manejar correctamente el inventario, de manera que se cuente con un alto nivel de servicio sin incurrir en altos costos de mantenimiento y adquisición.

A diferencia de los productos terminados o las materias primas, los cuales son impulsados por los procesos de producción y la demanda de los clientes, los repuestos se mantienen en stock para apoyar las operaciones de mantenimiento o las fallas repentinas de los equipos.

A pesar de que esta situación es bien entendida por los gerentes y responsables de dichos equipos, la disyuntiva que se presenta es que por un lado hay altos costos de mantenimiento de inventario y por otro lado se evidencian elevados costos de escasez y demanda no satisfecha, lo cual afecta considerablemente el nivel de servicio e incrementa los costos de las compañías²⁸

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las industrias que está presentando la problemática anterior es la conformada por los ingenios azucareros, en donde se están evidenciando altos tiempos de inactividad de las máquinas cosechadoras, que son catalogadas como el activo más importante de la organización ya que se encargan del corte y levante de caña, por ende son claves en la eficiencia y productividad del proceso de fabricación de azúcar.

Dado que los altos tiempos de inactividad en las cosechadoras son un problema crítico dentro de esta industria, ya que representan altos costos de subutilización, recursos, pérdida de productividad y eficiencias en la planta de producción. La reacción que se está generando dentro de los ingenios es la de almacenar cada

²⁸NENES George, PANAGIOTIDOU Sofia, TAGARAS George. Inventory management of multiple items with irregular demand: A case study. en: European Journal Of Operation Research. Vol.2. P 313.

vez más de referencias de repuestos, incrementando así los costos de mantenimiento sin mejorar el nivel de servicio.

Adicional a lo anterior, debido a que la mecanización del proceso de cosecha es relativamente nueva dentro de los ingenios, la respuesta de los proveedores en las entregas de los repuestos es baja y como medida de contingencia los ingenios están adquiriendo altos stocks que garanticen un buen nivel de servicio. Lo cual, solo ha generado altos costos y no ha disminuido los tiempos de inactividad de las cosechadoras.

Con lo anterior, se puede observar que la problemática en la gestión de inventarios de repuestos de las cosechadoras en los ingenios azucareros es un problema crítico para la industria, por lo que el presente proyecto diseña un sistema de control de inventarios para los repuestos de estas máquinas agrícolas que reduzca los inconvenientes presentados.

3. JUSTIFICACIÓN

Abordar la problemática presentada a partir del desarrollo de un sistema de control de inventarios trae diversos beneficios que se enunciarán a continuación:

3.1 EMPRESA

Para la empresa es importante abordar la problemática planteada porque esto le permitirá tener una mayor respuesta a los requerimientos del área de cosecha, lo cual conllevará a mayores cantidades de caña cosechada y por ende a aumentos en la producción de la organización. Adicionalmente, la propuesta apunta a la reducción de los altos costos generados, tales como los costos de inactividad de las máquinas, los costos de mantenimiento de inventarios y los costos de adquisición.

Actualmente, en el ingenio, el tiempo de inactividad promedio de una cosechadora una vez entra a mantenimiento es de 15 a 25 días²⁹, llegando en algunas ocasiones a 2 meses, por falta de repuestos. Lo cual ha generado altos costos de inactividad, pues una hora de paro de estas máquinas cuesta en promedio \$200.000³⁰ y se ha calculado que el costo total anual por inactividad está alrededor de \$ 1.152.000.000³¹.

Adicionalmente, el inventario de repuesto para estas cosechadoras ha estado en constante crecimiento y representa el 40%³² de los materiales del taller agrícola. Este inventario en dinero representa alrededor de \$ 850.000.000.

Con lo anterior, se evidencia la necesidad que se tiene de plantear un sistema de control de inventarios que permita dar un manejo adecuado a los repuestos de las cosechadoras, de manera que se cuente con ellos oportunamente, se administren correctamente los inventarios y se reduzcan los costos de mantenimiento.

No tener un sistema de control de inventario para los repuestos de las cosechadoras implica seguir trabajando sobre lo urgente, con poca orientación a la planeación, elevados costos y disminución de la productividad de la cosecha. Siendo este último aspecto crítico para el crecimiento de la organización.

²⁹*Información suministrada por la empresa.

³⁰*Ibíd.

³¹*Ibíd.

³²Ibíd.

3.2 RECURSO HUMANO

Las personas que realizan día a día trabajo operativo con las cosechadoras se benefician con este proyecto porque pueden actuar eficientemente y sus indicadores mejorarían y cumplirían a satisfacción sus labores.

3.3 JUNTA DIRECTIVA

Con este trabajo se reducirían costos, se aumentaría la productividad y se aprovecharían eficientemente los recursos, lo cual generaría competitividad y posibilidad de crecimiento de la organización.

3.4 ESTUDIANTE

Tratar este problema es importante para el estudiante porque le permite conocer a fondo uno de los temas más representativos de la ingeniería industrial que es la Gestión de Inventarios. Además de poder interactuar con problemas de la vida real y aplicar los conocimientos teóricos aprendidos durante la carrera para la solución de dichos problemas. Todo lo anterior, aportando experiencia para futuros retos y crecimiento personal y profesional.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de control de inventarios que garantice el suministro oportuno de repuestos en la reparación de las máquinas cosechadoras en un ingenio azucarero del Valle del Cauca.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las particularidades y características principales de los repuestos de las cosechadoras, a partir de unos criterios de decisión y un análisis detallado del comportamiento de los mismos.
- Clasificar el inventario de repuestos de las cosechadoras, de acuerdo a sus principales características mediante una técnica de clasificación ABC multicriterio.
- Desarrollar un sistema de pronóstico para los repuestos de las cosechadoras clasificados como A, que establezca las necesidades futuras y sirva como entrada para la implementación del sistema de control de inventarios.
- Realizar un sistema de control de inventario para los repuestos de las cosechadoras tipo A, que determine los parámetros de revisión, control y reposición del inventario de repuestos, garantizando el nivel de servicio especificado.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. MARCO TEÓRICO

Para llevar a cabo un eficiente sistema de gestión de inventarios se deben tener en cuenta diversos conceptos teóricos y fórmulas matemáticas que se encuentran enmarcadas dentro del área de administración y gestión de operaciones.

El propósito de este capítulo es presentar aquellos conceptos teóricos relevantes que se pretenden tener en cuenta para la ejecución del presente proyecto. Se iniciará exponiendo las técnicas de clasificación de inventarios, posteriormente se continuará presentando los sistemas de pronósticos y por último se culminará con los sistemas de control.

5.1.1. Técnicas de clasificación de inventarios. La técnica que se ha utilizado tradicionalmente para la clasificación de inventarios es el análisis ABC que se vale de un único criterio para realizar dicha clasificación. Dado que existen artículos como los repuestos que se deben clasificar teniendo en cuenta otros criterios como la criticidad del inventario, el nivel de obsolescencia y la rotación, han surgido otras técnicas de clasificación que permiten la incorporación de más criterios, estas técnicas son llamadas multicriterio y una de las más conocidas es la AHP.

5.1.1.1. Clasificación ABC³³. Debido a la gran cantidad de materiales que se utilizan en la producción en muchas plantas de manufactura, puede resultar deseable clasificar los materiales según el nivel de análisis que ameriten. Un procedimiento para clasificar los materiales es el método ABC, que se basa en la idea de que un solo pequeño porcentaje de los materiales representa la mayor parte del valor del inventario.

Observaciones sobre la clasificación ABC:

Los materiales A representan solo un 20% de los materiales en inventario, pero contienen 75% de su valor de inventario.

³³GAITHER Norman, FRAZIER Greg. Administración de Producción y Operaciones. CengageLearning Editores, 2000, p. 383 – 384.

Los materiales B representan 30% de los materiales en inventario y el 20% del valor del inventario.

Los materiales C representan 50% de los materiales del inventario y 5% del valor del inventario.

Esta clasificación sugiere que mientras más elevado sea el valor del inventario de un material, este deberá analizarse con más detalle. Por lo general, los materiales A continuación se analizarán de manera extensiva y los materiales C se analizarían muy poco.

5.1.2. Técnica multicriterio AHP. El Proceso de Análisis Jerárquico es una metodología usada para medir y simplificar, evaluando alternativas cuando se tienen en cuenta diferentes criterios. Este método cumple unas funciones básicas las cuales comienzan con la estructuración de la complejidad, donde se descompone un objetivo en factores más fáciles de comprender. También el AHP permite realizar mediciones de factores a partir de estimaciones numéricas, tiene gran flexibilidad aceptando variedad de aplicaciones en diferentes campos.

Los subcriterios, las alternativas y los criterios son evaluados de acuerdo con una escala de medición por parejas de la siguiente forma (Vidal, 2010):

- 1 = Igualmente preferida
- 3 = Moderadamente preferida
- 5 = Fuertemente preferida
- 7 = Muy fuertemente preferida
- 9 = Extremadamente preferida

La técnica del AHP consta de los siguientes pasos sucesivos:

- Se construye la matriz de preferencias (o matriz de comparación por parejas) entre todas las alternativas con respecto de cada uno de los criterios.
- Cada matriz de preferencias se normaliza dividiendo cada término de la misma entre la suma de los elementos de su columna respectiva.
- A partir de cada matriz de preferencias, se obtiene el vector de prioridad de cada criterio promediando los términos de cada fila de la matriz normalizada.
- Se construye la matriz de preferencias para los criterios propiamente dichos, se normaliza de la misma forma y se obtiene el vector de prioridad de los criterios en forma semejante a como se obtuvo para cada criterio. Este paso es equivalente al darle el peso o importancia a cada criterio en el método de calificación absoluta.
- Se verifica que tanto cada matriz de preferencias correspondiente a cada criterio como la matriz de preferencias de los criterios propiamente dichos no dañe la condición de consistencia establecida por el coeficiente del mismo nombre. El

coeficiente de consistencia para cada criterio debe ser menor o igual que 0.1. Si no cumple con esa condición, hay que determinar el origen de cada inconsistencia, corregirla y realizar de nuevo los pasos hasta que cumpla la condición.

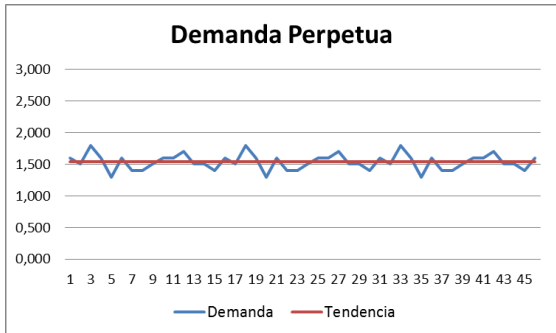
- Por último se calcula el producto entre una matriz formada por todos los vectores de prioridad de cada criterio y el vector de prioridad de los criterios propiamente dichos. El resultado es el vector de prioridad de las alternativas y es el que puede servir de guía para tomar la decisión final respecto de las mismas.

5.2. SISTEMAS DE PRONÓSTICOS DE DEMANDA

Las organizaciones modernas deben desarrollar sistemas de pronósticos para tomar decisiones adecuadas acerca del futuro incierto, lo cual implica el uso de datos históricos y de la experiencia para realizar proyecciones que permitan actuar correctamente y obtener una ventaja competitiva en el actual entorno cambiante.

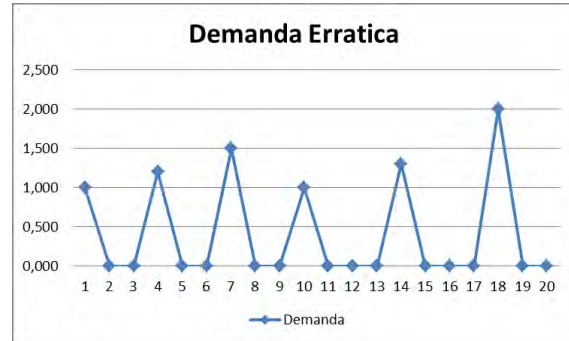
Existen diferentes tipos de pronósticos como el promedio móvil, la suavización exponencial simple, la suavización exponencial doble y el método de Croston. La aplicación de estos diferentes tipos de pronóstico depende en gran medida del patrón de demanda que se esté abordando. En la Tabla No. 1 se encuentra un resumen de los tipos de pronósticos aplicables a cada patrón de demanda.

Tabla 1. Tipos de pronósticos y patrones de demanda.

TIPOS DE PRONÓSTICOS		PATRÓN DE DEMANDA
Promedio Suavización simple	móvil y exponencial	
Suavización	exponencial	Demanda con Tendencia

doble

Método de Croston



Fuente: Elaborada a partir de. VIDAL, Carlos Julio. Fundamentos de Control y Gestión de Inventarios. ed:Programa Editorial Universidad Del Valle, 2010.p.5

5.2.1. Indicadores de Eficiencia del pronóstico³⁴. Para determinar la eficiencia de cada pronóstico y para poder realizar una comparación entre cada uno es necesario determinar la precisión del pronóstico, la cual se mide con los errores del pronóstico, que se calculan como la diferencia entre el valor real y el valor observado. Las expresiones más comunes para calcular los errores del pronóstico son:

La MAD se define como el promedio de los errores absolutos sobre un número determinado de periodos, de la siguiente forma donde n es el número de periodos:

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |x_t - \hat{x}_t|}{n} \quad (1)$$

El ECM se define como el promedio de los errores cuadráticos sobre un número determinado de periodos, así:

$$ECM = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \hat{x}_t)^2}{n} \quad (2)$$

La MAPE se define como el error absoluto porcentual de la media, es decir:

$$MAPE = 100 \frac{\sum_{i=1}^n |real - pronostico| / real}{n}$$

³⁴VIDAL Carlos Julio. Fundamentos de Control y Gestión de Inventarios. ed:Programa Editorial Universidad Del Valle, 2010.p.5

5.2.2. Promedio móvil³⁵. El método de promedio móvil usa un número de valores de datos históricos reales para generar un pronóstico. Los promedios móviles son útiles si podemos suponer que la demanda del mercado permanecerá relativamente estable en el tiempo. El promedio móvil se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$PromedioMóvil = \frac{\sum \text{demanda de los } n \text{ periodos anteriores}}{n} \quad (3)$$

Donde n es el número de periodos que comprende.

5.2.3. Suavización exponencial simple³⁶. Mientras que el método de promedios móviles sólo toma en cuenta las observaciones más recientes, la suavización exponencial simple proporciona un promedio móvil con un peso exponencial de todos los valores observados con anterioridad. Con frecuencia el modelo es apropiado para datos que tienen una tendencia predecible hacia arriba o hacia abajo.

La ecuación matemática de este sistema de pronósticos es:

$$S_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)S_{t-1} \quad (4)$$

Dónde:

S_t = Pronóstico realizado al final del periodo (periodo actual)

X_t = Demanda real al final del periodo (periodo actual)

S_{t-1} = Pronóstico del periodo – (periodo anterior)

α = Constante de suavización

5.2.4. Suavización exponencial doble³⁷. La incorporación de un componente de tendencia en pronósticos suavizados exponencialmente se conoce como suavización exponencial doble, ya que tanto la estimación del promedio como la de la tendencia se suavizan.

El modelo subyacente a esta técnica de pronóstico es la siguiente:

³⁵Render Barry. Principios de Administración de Operaciones. Pearson Educación, 2004, p. 109 – 111.

³⁶HANKE John E, WICHERN Dean W. Pronosticos en los Negocios. Pearson Educación, 2006. p. 121 – 122.

³⁷GAITHER Norman, FRAZIER Greg. Administración de Producción y Operaciones. Cengage Learning Editores, 2000, p. 82 – 84.

$$\hat{X}_{t+\tau}(t) = 2 + \frac{\alpha\tau}{(1+\alpha)}S_t - (1 + \frac{\alpha\tau}{(1+\alpha)})S_t^2 \quad (5)$$

Dónde:

X_t = Valor real u observación de la demanda en el período t

α = Constante de suavización.

τ = Periodos adelante pronosticados.

Los valores de S_t y S_t^2 se obtienen con las siguientes fórmulas:

$$S_t = \alpha X_t + (1-\alpha)S_{t-1} \quad (6)$$

$$S_t^2 = \alpha S_t + (1+\alpha)S_{t-1}^2 \quad (7)$$

Los valores de iniciación de S_t y S_t^2 se obtienen mediante las siguientes expresiones matemáticas.

$$S_0 = \hat{b}_1(0) - \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)\hat{b}_2(0) \quad (8)$$

$$S_t^2 = \hat{b}_1(0) - 2\left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)\hat{b}_2(0) \quad (9)$$

Dónde:

\hat{b}_1 = Estimación del valor constante alcanzado por la demanda (corte con el eje y), determinado con base en la regresión lineal de datos históricos, referido al sistema de coordenadas desde donde se van a iniciar los pronósticos.

\hat{b}_2 = Estimación de la pendiente de la tendencia de la demanda (creciente o decreciente) determinada con base en los datos históricos, la cual no cambia con relación al sistema de coordenadas utilizado.

5.2.5. Método de Croston³⁸. El control de inventarios de ítems de demanda errática y de ítems nuevos en el mercado es un problema muy complejo. A los ítems que presentan demanda errática se les puede aplicar los sistemas de pronósticos de suavización exponencial simple y doble, pero su comportamiento no supera al de otros métodos que han sido diseñados especialmente para este tipo de demandas.

Croston propuso un método para pronosticar demandas erráticas, el cual ha demostrado ser hasta la fecha una muy buena alternativa. Esencialmente, el método de Croston divide los eventos de demanda intermitente en dos. Primero, se pronostica la probabilidad de que ocurra o no una demanda en el período siguiente, de acuerdo con las observaciones anteriores; equivalentemente, esto

³⁸VIDALOp. Cit. p. 29

corresponde a estimar el número de períodos entre ocurrencias de demanda mayores que cero. Seguidamente, se pronostica el posible tamaño de la demanda, de acuerdo con las observaciones anteriores sin tener en cuenta las demandas iguales a cero.

Considérese la siguiente notación:

x_t = Demanda observada en el período t .

y_t = Variable binaria igual a 1 si ocurre una demanda mayor que cero en el período t ; igual a cero de lo contrario.

$z_t = x_t \times y_t$ = Tamaño de la demanda ocurrida en el período t .

n_t = Número de períodos transcurridos desde la última demanda mayor que cero hasta el período t .

\hat{n}_t = Valor estimado de n al final del período t .

\hat{z}_t = Valor estimado de z al final del período t .

Con base en la anterior notación, al final de cada período t se verifica el valor de x_t . Si $x_t > 0$, o sea que ocurre cierta demanda positiva, entonces los estimadores se actualizan de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\hat{n}_t = \alpha n_t + (1 - \alpha)\hat{n}_{t-1} \quad (11)$$

$$\hat{z}_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)\hat{z}_{t-1} \quad (12)$$

Donde α es una constante de suavización (Croston sugiere que $0.1 \leq \alpha \leq 0.2$, aunque en la práctica no hay inconveniente en probar con otros intervalos como por ejemplo $0.01 \leq \alpha \leq 0.30$ e incluso con $0 \leq \alpha \leq 1$).

Si $x_t = 0$, entonces no se actualiza ni el estimador del tamaño de la demanda ni el estimador de n , o sea que se deja $\hat{n}_t = \hat{n}_{t-1}$ y $\hat{z}_t = \hat{z}_{t-1}$. El valor de n_t se debe actualizar en cada período, independientemente de si ocurre o no una demanda positiva, ya que esta variable cuenta el número de períodos desde la última demanda mayor que cero hasta el final del período actual. Obsérvese que si no ocurre demanda alguna, este contador se incrementa en 1; por el contrario, si ocurre una demanda positiva, este contador reinicia su valor en 1 (Este contador no reinicia su valor en 0, puesto que el mínimo número de períodos entre demandas mayores que cero que puede ocurrir es 1, cuando ocurren dos demandas positivas consecutivas).

Nótese en las ecuaciones anteriores que se necesitan valores de inicio \hat{n}_0 y \hat{z}_0 . No se ha encontrado en la literatura referencia sobre cómo estimar estos valores. Se propone, por lo tanto, hacerlo con parte de la historia de demanda del ítem, tal como se ha realizado en las secciones anteriores.

Finalmente, el pronóstico al final del período t para el período siguiente se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\hat{x}_t = \frac{\hat{z}_t}{\hat{n}_t} \quad (13)$$

5.2.6. Errores Suavizados y Señales de Rastreo³⁹. Cuando se está trabajando con pronósticos es importante tener un indicador que permita visualizar los sesgos, desviaciones o problemas del sistema de pronóstico utilizado. Por tal motivo es importante calcular métricas como los errores suavizados y la señal de rastreo.

La idea de suavización de los errores de pronóstico es simplemente aplicar el operador de suavización con una constante de suavización diferente. Para el caso del error de pronóstico del periodo T, denominado Q(T), esta suavización se logra mediante la expresión:

$$\text{Error Suavizado } Q(T) = w e(T) + (1-w)Q(T-1) \quad (14)$$

Donde w es una constante de suavización diferente a la que se está utilizando para los pronósticos, la cual, normalmente es 0.1.

Dado que el valor esperado de los errores del pronóstico es cero, entonces siempre se define como valor inicial $Q(0) = 0$.

Análogamente, la MAD puede también ser suavizada mediante la ecuación:

$$\text{MAD suavizada } MAD(T) = w |e(T)| + (1-w)MAD(T-1) \quad (15)$$

Aquí la MAD inicial, $MAD(0)$ debe estimarse, bien sea a partir de datos históricos o con algunas ecuaciones derivadas en la literatura. Por ejemplo, Montgomery en su libro⁴⁰, presentan las siguientes expresiones para estimar la MAD inicial para un pronóstico de suavización exponencial doble:

$$MAD(0) = 0,8\sigma_\epsilon \sqrt{\sqrt{C_1}} \quad (16)$$

Dónde:

$$C_1 = 1 + \frac{\alpha}{(1+\beta)^3} [(1 + 4\beta + 5\beta^2) + 2\alpha\tau(1 + 3\beta) + 2\alpha^2\tau^2]; \beta = 1 - \alpha \quad (17)$$

En esta ecuación, τ representa el número de periodos para los cuales se hace la estimación (normalmente $\tau = 1$), además:

³⁹VIDALOp. Cit p 29

⁴⁰MONTGOMERY, D.C., L.A. Johnson, & J.S. Gardiner Forecasting & Time Series Analysis.2ª Edición, McGraw-Hill, Inc., New York, 1990. p.381

$$\sigma_{\epsilon} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^m (x_t - \hat{x}_t)^2}{m-2}} \quad (18)$$

Por lo tanto la formula final para la MAD inicial es la siguiente:

$$\text{MAD}(0) = 0.8 \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{41} (x_t - \hat{x}_t)^2}{41-2}} \left(\sqrt{1 + \frac{\alpha}{(1+\beta)^3} [(1 + 4\beta + 5\beta^2) + 2\alpha\tau(1 + 3\beta) + 2\alpha^2\tau^2]}; \beta = 1 - \alpha \right) \quad (19)$$

Es simplemente la estimación de la desviación estándar de los errores del pronóstico, calculada con base en los residuos de la regresión lineal de los m datos que se toman para inicializar el pronóstico.

Señales de Rastreo

Con base en los errores suavizados definidos anteriormente se pueden definir diversas señales de rastreo. El objetivo fundamental de una señal de rastreo es informar acerca de posibles desviaciones, sesgos y problemas del sistema de pronósticos que se está utilizando. La señal de rastreo más comúnmente utilizada, y de más fácil comprensión, se define como:

$$\text{Señal de rastreo en el periodo } T = \frac{Q(T)}{\text{MAD}(T)} \quad (19)$$

En la anterior señal de rastreo no puede ser mayor que 1 en valor absoluto. Un valor absoluto de esta señal cercado a 1 indica problemas con el pronóstico. En general, se recomienda que cuando dos o más señales de rastreo sucesivas presentan valores mayores que un valor de 0.60, debe revisarse el sistema de pronósticos, ya que puede estar fuera de control.

Una sola señal de rastreo superior al valor permisible puede no indicar un problema en el sistema de pronósticos, sino un dato atípico de demanda que no representa un verdadero cambio en la tendencia de la misma. Por ello se recomienda esperar hasta que ocurran dos señales de rastreo sucesivas fuera del rango permitido.

5.3. SISTEMAS DE CONTROL DE INVENTARIO⁴¹

El siguiente paso en la determinación del sistema de gestión de inventarios, es la definición de la política de inventario, la cual debe resolver tres preguntas fundamentales para cada ítem en particular:

⁴¹VIDAL Op. Cit p.50

- ¿Con qué frecuencia debe revisarse el nivel de inventario?
- ¿Cuándo debe ordenarse?
- ¿Qué cantidad debe ordenarse en cada pedido?

Para responder estas preguntas, existen diferentes tipos de sistemas de control que se pueden utilizar. En donde la notación básica es la siguiente:

s = Punto de reorden o de pedido, o sea el nivel del inventario efectivo para el cual debe emitirse una nueva orden.

Q = Cantidad a ordenar en cada pedido.

R = Intervalo de revisión del nivel de inventario efectivo.

S = Nivel máximo de inventario efectivo hasta el cual debe ordenarse.

5.3.1. Sistema de revisión continuo⁴²

En la revisión continua, como su nombre lo indica, teóricamente se revisa el nivel de inventario en todo momento. Sin embargo, esto no es posible en la práctica. Lo que se hace entonces es revisar el inventario cada vez que ocurre una transacción (despacho, recepción, demanda, etc.) y por ello también se le conoce como sistema de reporte de transacciones.

En un sistema de revisión continua es difícil coordinar en general las actividades de control y el control de varios ítems simultáneamente, pero este sistema necesita un menor inventario de seguridad que el sistema periódico, ya que la protección sólo debe hacerse sobre el tiempo de reposición L .

Existen dos tipos de sistemas de revisión continua que se describen a continuación:

Sistema continuo (s, Q), en este sistema, cada vez que el inventario efectivo es igual o menor al punto de reordens, se ordena una cantidad fija Q .

Sistema continuo (s, S), este sistema establece que cuando el inventario efectivo llega al punto de reorden (s), se debe ordenar la cantidad necesaria para que el inventario efectivo llegue a un nivel máximo S .

5.3.2. Sistema de revisión periódica⁴³

En general, este sistema permite coordinar las actividades y el control de ítems en forma simultánea, pero requiere de un mayor inventario de seguridad que el

⁴²Ibíd. p.50

⁴³Ibíd. p.50

sistema continuo, ya que la protección debe garantizarse para un intervalo de tiempo igual al tiempo de reposición + el intervalo de revisión ($R + L$).

Existen dos tipos de sistemas de revisión continua que se describen a continuación:

Sistema periódico (R, s), Este sistema se conoce también como el sistema del ciclo de reposición y se encuentra a menudo en organizaciones que no utilizan control sistematizado de los inventarios. Aquí, cada R unidades de tiempo se revisa el inventario efectivo, y se ordena una cantidad tal que este inventario suba al valor máximo S .

Sistema periódico (R, s, S). Este sistema propone que el inventario se debe revisar cada R unidades de tiempo y si el nivel es igual o menor a s unidades, se debe ordenar una cantidad tal que eleva el nivel del inventario efectivo a un valor máximo S .

5.3.3. Costo Total Relevante⁴⁴

Para comparar las políticas de control de inventario, uno de los conceptos que se emplea es el Costo Total Relevante, en este se utiliza el concepto para diseñar la estructura de la función objetivo, la cual comprende los costos de ordenamiento, alistamiento y los de mantenimiento del inventario.

Parámetros:

A = El costo fijo de alistamiento u ordenamiento (\$/orden).

D = La tasa de demanda del ítem (unidades/periodo de tiempo).

r = El costo de mantener el inventario (%/periodo de tiempo o \$/(\$·periodo de tiempo)).

v = El valor unitario del ítem (\$/unidad).

Variable de decisión

Q = Tamaño del pedido o de la orden (unidades).

$CTR(Q)$ = El costo total relevante en función del tamaño de pedido Q (\$/año).

El costo total relevante anual en función de Q vendría dado por:

$$CTR = \frac{AD}{Q} + \frac{Q}{2}vr \quad (14)$$

En la fórmula del CTR no se consideró el término Dv , dado que este tiene un valor constante, pues la tasa de demanda y el valor unitario del ítem se mantienen igual durante el periodo de tiempo analizado.

⁴⁴Ibíd. p.50

6. DESARROLLO PROPUESTA

Para la validación de la propuesta desarrollada se utilizaron datos reales de los repuestos de las cosechadoras de un ingenio azucarero del Valle del Cauca. Los datos analizados fueron obtenidos del ERP que maneja el ingenio y hacen referencia a información de todos los repuestos que se han utilizado durante los tres últimos años para realizar mantenimientos y reparaciones a estas máquinas agrícolas. En total son 414 repuestos que se denominarán con un número consecutivo para garantizar la privacidad de la información.

Adicionalmente, dentro del desarrollo de la propuesta se contó con el conocimiento y participación de aquellas personas que durante su operación laboral se encuentran en constante contacto con las cosechadoras y sus repuestos. Quienes además se ven directamente afectadas por la problemática planteada.

La propuesta inicia con un método de clasificación multicriterio de inventarios, que busca categorizar las diferentes referencias de repuestos de acuerdo a criterios importantes que normalmente son subestimados en la toma de decisiones. Posteriormente, se utilizan técnicas de pronósticos para predecir el consumo futuro de los repuestos y por último, se toma la información del sistema de pronóstico como entrada para implementar un sistema de control de inventarios, que permita garantizar la oportuna reposición de las existencias y estime las cantidades óptimas de compra, incurriendo en el mínimo costo total relevante. La figura No. 1 representa la propuesta metodológica que se desarrollará en el presente capítulo.

Figura 1. Propuesta Metodológica.



Fuente: elaboración propia

6.1. CLASIFICACIÓN MULTICRITERIO AHP

Con el fin de tomar en consideración diversos criterios importantes para la categorización de los repuestos, se utilizó la técnica de clasificación multicriterio AHP para la clasificación del inventario, tomando como referencia el trabajo realizado por Cortes y Morales⁴⁵. La importancia de utilizar una técnica de clasificación multicriterio consiste en identificar aquellos repuestos importantes que deben controlarse con detalle y que su gestión genera un impacto positivo en el problema abordado.

Se inició con la identificación de los criterios relevantes a considerar, a los cuales se les dio una calificación de acuerdo a los datos obtenidos y al conocimiento y experiencia de un grupo de personas seleccionadas que participaron en el desarrollo del presente trabajo.

Con la calificación dada a cada criterio, se estableció un peso de importancia para cada uno y se evaluaron todos los repuestos de acuerdo al peso de cada criterio, obteniendo así una clasificación ABC, donde los repuestos A son aquellos con mayor calificación, críticos para la operación y por lo tanto se deben tratar con

⁴⁵CORTÉS. E, MORALES L. V. DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE INVENTARIOS DE REPUESTOS EN UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE LA CIUDAD DE CALI. Tesis de grado para optar por el título de ingeniería industrial. Facultad de ingenierías. Universidad del Valle.

mayor atención, los repuestos B son importantes para la operación y se deben manejar con cuidado pero no tienen tanto impacto como los A. Por último, los repuestos C son aquellos que tienen poco impacto pero representan la mayor cantidad de piezas.

6.1.1. Selección y calificación de Criterios. En la selección de criterios se tomaron como referencia propuestas mencionadas en el marco teórico tales como la de Cakir & Canbolat (2008) y Ramanathan (2006) quienes proponen criterios como la criticidad de agotamiento, el costo de los repuestos, el consumo, la rotación del inventario y el tiempo de entrega.

Para la calificación se contó en el conocimiento y experiencia de personas como el jefe de cosecha, el jefe del taller agrícola, el jefe de compras, el supervisor de cosechadoras y el comprador de repuestos, quienes en su día a día se ven afectados por la falta de repuestos oportunos para la reparación y mantenimiento de máquinas agrícolas.

Teniendo en cuenta la metodología de la clasificación AHP, la calificación se realizó por pares de criterio, utilizando la siguiente escala de medición:

- 1 Igualmente preferido
- 3 Moderadamente Preferido
- 5 Fuertemente preferido
- 7 Muy fuertemente preferido
- 9 Extremadamente preferido

El cuadro No. 1 Representa la calificación que los encuestados le dieron a cada pareja de criterios. Con esta calificación se calculó la matriz de comparación por pares presentada en la tabla No. 4

Cuadro 1. Calificación por pares de criterios

Encuestados \ Criterios	Costo	Costo	Costo	Costo	Consumo	Consumo	Consumo	Rot Inv	Rot Inv	Criticidad
	Consumo	Rot Inv	Criticidad	lead time	Rot Inv	Criticidad	lead time	Criticidad	lead time	lead time
Jefe de Cosecha	1/5	1/5	1/9	1/3	1/2	1/4	1/2	1/4	1/2	3
Jefe de Taller	1/5	1/3	1/6	1/3	1	1/5	1/2	1/7	1/3	4
Jefe de compras	1/5	1/4	1/9	1/3	1	1/6	1/2	1/4	1/9	5
Supervisor de Cosechadoras	1/5	1/4	1/9	1/2	1	1/5	1/2	1/5	1/5	4
Comprador de Repuestos	1/5	1/4	1/5	1/2	1	1/3	1/2	1/7	1/5	4
Total	1,00	1,29	0,70	2,00	4,50	1,15	2,50	1,00	1,25	20,00
Promedio	0,20	0,26	0,14	0,40	0,90	0,23	0,50	0,20	0,25	4,00

Fuente: Elaboración propia

Para dar un resultado único a cada criterio, tomando en cuenta la calificación dada por los involucrados se calculó el promedio de cada columna. Para el par costo vs consumo se calculó de la siguiente manera:

$$\bar{x} = \frac{\frac{1}{5} + \frac{1}{5} + \frac{1}{5} + \frac{1}{5} + \frac{1}{5}}{5} = 0.20$$

El cuadro No. 2 presenta los resultados obtenidos del promedio para cada par de criterios.

Cuadro 2.Resultado promedio para cada par de criterio

Criterio 1	Criterio 2	Media Geométrica
Costo	Consumo	0,20
Costo	RotInv	0,26
Costo	Criticidad	0,14
Costo	lead time	0,40
Consumo	RotInv	0,90
Consumo	Criticidad	0,23
Consumo	lead time	0,50
RotInv	Criticidad	0,20
RotInv	lead time	0,25
Criticidad	lead time	4,00

Fuente: Elaboración propia

6.1.2. Cálculo Peso de cada criterio – Vector Prioridad. Con los resultados de la media geométrica se procede a realizar la matriz de comparación de criterios de acuerdo a la metodología AHP. En donde la diagonal de la matriz es igual a 1. Los resultados de la tabla No. 3 se indican en la celda correspondiente y para las demás celdas que queden vacías se agrega la media geométrica inversa de la comparación. Por ejemplo, para la celda que compara los criterios costo vs consumo el valor es igual a 0.20 y para la celda que compara consumo vs costo el valor es la inversa de la media geométrica anterior, es decir 1/0.20. La matriz de comparación de criterios se puede observar en el cuadro No. 3.

Cuadro 3. Matriz de comparación de criterios

	Costo	Consumo	RotInv	Lead Time	Criticidad
Costo	1	0,20	0,26	0,40	0,14
Consumo	5,00	1	0,90	0,50	0,23
RotInv	3,89	1,11	1	0,25	0,20
Lead time	2,50	2,00	4,00	1	0,25
Criticidad	7,14	4,35	5,00	4,00	1

Fuente: Elaboración propia

Para calcular el vector de prioridad de cada criterio se construye la matriz normalizada dividiendo cada valor de comparación de criterios entre la suma de la columna correspondiente. El vector de prioridad es igual al promedio de la fila de la matriz y representa la importancia relativa de los criterios comparados.

El cuadro No. 4 presenta la matriz normalizada con el vector de prioridad, el cual se representa gráficamente en la figura No. 2 y es igual al promedio de las filas.

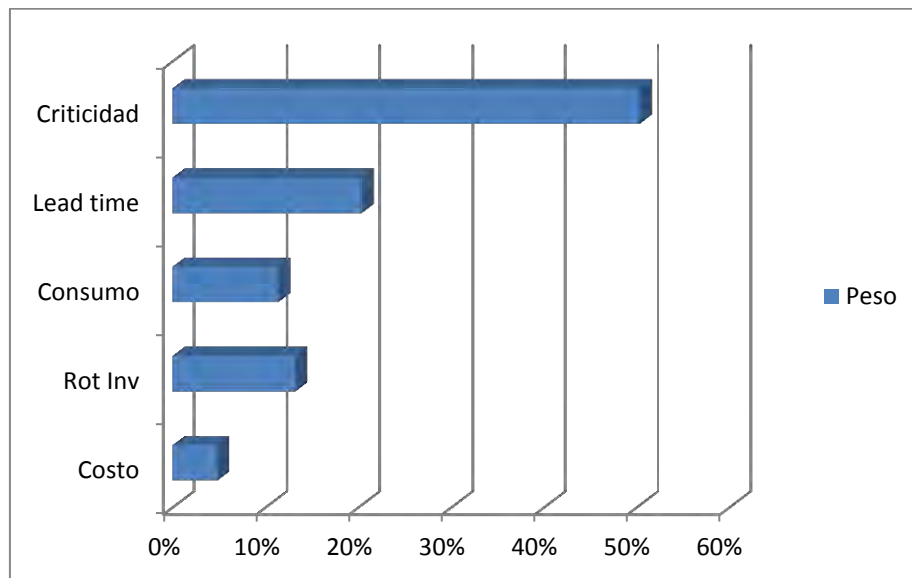
Cuadro 4. Matriz de normalizada y vector de prioridad.

A continuación se presentan la matriz normalizada y el vector prioridad.

	Costo	Consumo	RotInv	Lead Time	Criticidad	Vector Prioridad
Costo	0,05	0,02	0,02	0,07	0,08	5%
Consumo	0,26	0,12	0,08	0,08	0,13	13%
RotInv	0,20	0,13	0,09	0,04	0,11	11%
Lead time	0,13	0,23	0,36	0,16	0,14	20%
Criticidad	0,37	0,50	0,45	0,65	0,55	50%

Fuente: Elaboración propia

Figura 2.Importancia de cada criterio



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura No. 2 el criterio con mayor peso es la criticidad, es decir la capacidad que tiene el repuesto para parar una máquina, entre estos se encuentran el motor y el vidrio parabrisas, ya que su carencia imposibilita la operación de la máquina. Por lo tanto entre más crítico sea un repuesto mayor peso tendrá.

El segundo criterio con mayor peso es el lead time, es decir el tiempo de entrega del repuesto. Por lo general, la mayoría de repuestos de las cosechadoras son importados y esto hace necesario prever con anterioridad el repuesto de manera que los altos tiempos de entrega no aumenten el tiempo de inactividad de la máquina.

El tercer y cuarto criterio son el consumo y la rotación de los repuestos. Aquellos repuestos que tienen un alto consumo y rotación son los que se usan regularmente para mantenimientos y es importante realizar seguimientos y mantener en stock para no afectar la efectividad de las reparaciones.

Por último, El criterio con menos peso fue el costo, pues a pesar de que este es un criterio importante no es tan relevante, ya que hay repuesto costosos que no paran la máquina y que pueden ser sustituidos fácilmente. Por otro, lado hay repuestos económicos como las cuchillas de corte que inhabilitan una máquina volviéndose críticos para la operación. Adicionalmente, un incremento en los costos de adquisición puede ser balanceado por la reducción en costos de mantenimiento de inventario.

6.1.3. Análisis de consistencia. Antes de concluir el análisis, debe calcularse el coeficiente de consistencia, “el cual valida que los juicios no tenga errores entre ellos, es decir que no se hayan producido contradicciones entre los mismos”⁴⁶. A continuación se presentan los pasos para realizar el cálculo del índice de consistencia.

- **Cálculo Suma Ponderada.** Es igual a la multiplicación de la matriz de comparación de criterios por el vector prioridad.

Cuadro 5. Suma Ponderada.

	Costo	Consumo	Rot Inv	Lead Time	Criticidad		Vector Prioridad	SP
Costo	1	0,20	0,26	0,40	0,14	X	5%	0,26
Consumo	5,00	1	0,90	0,50	0,23		13%	0,69
Rot Inv	3,89	1,11	1	0,25	0,20		11%	0,60
Lead time	2,50	2,00	4,00	1	0,25		20%	1,17
Criticidad	7,14	4,35	5,00	4,00	1		50%	2,80

Fuente: Elaboración propia

- **División Suma Ponderada con Vector de Prioridad.** Dando como resultado un vector que se utiliza para calcular el IC.

Cuadro 6. División Suma Ponderada con Vector Prioridad.

SP		VP		SP/VP
0,26	÷	5%	=	5,33
0,69		13%		5,23
0,60		11%		5,26
1,17		20%		5,73
2,80		50%		5,56

Fuente: Autor

- **Cálculo λ Max.** Es igual al promedio de los valores del vector SP/VP.

$$\lambda_{\text{Max}} = \frac{5.33+5.23+5.26+5.73+5.56}{5} = 5.42(15)$$

⁴⁶OREJUELA CABRERA, J. P., & OSORIO GÓMEZ, J. C. El proceso de análisis jerárquico (ahp) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia et Technica p.*, 247-252.

- **Calculo IC.** Se obtiene con la siguiente fórmula. Donde m es igual al número de criterios.

$$IC = \frac{(\lambda_{Max}-m)}{m-1} = \frac{5.42-5}{4} = 0.1055 \quad (16)$$

- **Calculo Consistencia.** Se obtiene con la siguiente fórmula. Donde IA es igual 1.12 cuando m = 5⁴⁷.

$$Consistencia = \frac{IC}{IA} = \frac{0.1055}{1.12} = 0.0942 \approx 9.42\% < 10\% \quad (17)$$

6.1.4. Clasificación de repuestos por peso de cada criterio. Una vez obtenido el peso de los criterios se procede a calificar cada repuesto de acuerdo al peso obtenido, esto con el fin de clasificar cada repuesto y encontrar los SKU tipo A que serán pronosticados y tratados en detalle. A continuación se presenta la clasificación por cada peso de criterio.

6.1.5. Clasificación de los repuestos por costo. Para la clasificación de los repuestos por costo se determinó el costo promedio de los repuestos en el último año y medio. Se tomó en consideración este periodo de tiempo para trabajar con datos actualizados y no tener en cuenta costos demasiado bajos que se presentaron durante el año 2009.

Dado que los costos de los repuestos varían considerablemente comparándose uno con otro. Es necesario normalizar el costo de los repuestos a fin de realizar una buena clasificación. La normalización se realiza dividiendo el costo de cada repuesto entre el costo del repuesto más alto, que en este caso es \$78.151.948 y hace referencia al costo del repuesto número 349. Los datos normalizados se encuentran en la columna 3 del cuadro No. 7.

Una vez normalizados los valores se calcula el peso del repuesto para el criterio evaluado, multiplicando el valor normalizado por el peso del criterio obtenido en la sección anterior. El peso del repuesto se encuentra en la columna 5 del cuadro No. 7. En esta tabla se presentan los pesos de los 11 primeros repuestos.

⁴⁷ Ibíd.p.247

Cuadro 7. Clasificación de los repuestos por Costo

No.	Costo	Normalización	Peso Criterio	Peso Repuesto
349	\$ 78.151.948	1,0000000	5%	0,0500
360	\$ 23.361.137	0,2989194	5%	0,0149
330	\$ 16.033.167	0,2051538	5%	0,0103
398	\$ 13.984.589	0,1789410	5%	0,0089
380	\$ 13.072.316	0,1672679	5%	0,0084
236	\$ 12.981.752	0,1661091	5%	0,0083
201	\$ 12.090.000	0,1546986	5%	0,0077
308	\$ 12.003.706	0,1535945	5%	0,0077
367	\$ 10.428.132	0,1334341	5%	0,0067
342	\$ 10.325.017	0,1321146	5%	0,0066
368	\$ 7.722.373	0,0988123	5%	0,0049
306	\$ 7.333.797	0,0938402	5%	0,0047

Fuente: Elaboración propia

6.1.6. Clasificación de los repuestos por consumo. Para la clasificación de los repuestos por consumo se tomó información histórica desde junio del año 2009 y se calculó el promedio de consumo mensual.

El procedimiento que se siguió para la clasificación de los repuestos por consumo es igual al procedimiento descrito anteriormente. En el cuadro No.8 se presenta la clasificación de los repuestos por consumo.

Cuadro 8. Clasificación de los repuestos por Consumo mensual

No.	Consumo	Normalización	Peso Criterio	Peso Repuesto
1	225	1	13%	0,1300
2	167	0,73996755	13%	0,0962
11	135	0,596863169	13%	0,0776
5	115	0,510762574	13%	0,0664
3	81	0,357598702	13%	0,0465
196	34	0,150027042	13%	0,0200
10	32	0,14375338	13%	0,0187
9	30	0,132287723	13%	0,0172
7	21	0,095186587	13%	0,0124
45	19	0,082314765	13%	0,0100
342	13	0,057220119	13%	0,0100
8	10	0,043683072	13%	0,0057

Fuente: Elaboración propia

6.1.7. Clasificación de los repuestos por Rotación de Inventario. La clasificación de la rotación de inventario se obtuvo del ERP de la compañía que divide el costo de la mercancía entre el promedio del inventario. El cuadro No.9 presenta la clasificación por rotación de inventario de cada repuesto.

Cuadro 9. Clasificación de los repuestos por Rotación de inventario

No.	RotInv	Normalización	Peso Criterio	Peso Repuesto
8	13	1,00	11%	0,1100
12	9	0,69	11%	0,0762
14	6	0,48	11%	0,0529
2	6	0,46	11%	0,0508
19	6	0,42	11%	0,0465
4	5	0,38	11%	0,0423
1	4	0,33	11%	0,0360
65	4	0,33	11%	0,0360
70	4	0,31	11%	0,0338
3	4	0,29	11%	0,0317
21	4	0,29	11%	0,0317

Fuente: Elaboración propia

6.1.8. Clasificación de los repuestos por Criticidad. Para la clasificación de los repuestos por criticidad fue necesario que las personas que participaron en la calificación de los criterios, de acuerdo a su conocimiento y experiencia valoraran de 1 a 5 la criticidad de cada repuesto, donde 1 es el valor más bajo y 5 el más alto. Con la valoración obtenida se calculó el promedio a fin de tener un único dato, el cual se calculó de acuerdo con la operación del peso del criterio por la normalización que simplemente es la división de a calificación más alta sobre cada calificación. El cuadro No.10 presenta la clasificación de cada repuesto por criticidad.

Cuadro 10. Clasificación de los repuestos por criticidad

No.	Criticidad	Normalización	Peso Criterio	Peso Repuesto
1	5	1	50%	0,5000
2	5	1	50%	0,5000
3	5	1	50%	0,5000
4	5	1	50%	0,5000
5	5	1	50%	0,5000
7	5	1	50%	0,5000
8	5	1	50%	0,5000
9	5	1	50%	0,5000
10	5	1	50%	0,5000
11	5	1	50%	0,5000
12	5	1	50%	0,5000
13	5	1	50%	0,5000

Fuente: Elaboración propia

6.1.9. Clasificación de los repuestos por Lead Time. La información utilizada en la clasificación de los repuestos por lead time fue el tiempo de entrega promedio histórico, el tiempo promedio en días que han tenido los repuestos desde el año 2009. El cuadro No.11 presenta la clasificación de los repuestos por lead time.

Cuadro 21. Clasificación de los repuestos por lead time

No.	Lead time	Normalización	Peso Criterio	Peso Repuesto
42	30	1,00	20%	0,200
46	30	1,00	20%	0,200
94	30	1,00	20%	0,200
113	30	1,00	20%	0,200
190	30	1,00	20%	0,200
201	30	1,00	20%	0,200
203	30	1,00	20%	0,200
217	30	1,00	20%	0,200
287	30	1,00	20%	0,200
321	30	1,00	20%	0,200
344	30	1,00	20%	0,200
414	30	1,00	20%	0,200

Fuente: Elaboración propia

6.1.10. Peso total repuesto. Por último, para realizar la clasificación ABC tradicional de los repuestos, se agrupan en una sola tabla los pesos obtenidos anteriormente por los repuestos en cada criterio y se suman para obtener el peso total, el cual es ordenado de mayor a menor.

Cuadro 12. Clasificación de los repuestos por peso total

No	Peso Repuest o Costo	Peso Repuesto Consumo	Peso Repuesto RotInv	Peso Repuesto Criticidad	Peso Repuesto Lead Time	Peso Total	Clasif
1	0,0000	0,1300	0,0360	0,5000	0,0533	0,7193	A
11							
3	0,0008	0,0006	0,0148	0,5000	0,2000	0,7162	A
46	0,0007	0,0004	0,0127	0,5000	0,2000	0,7138	A
20							
1	0,0077	0,0002	0,0042	0,5000	0,2000	0,7122	A
94	0,0019	0,0006	0,0085	0,5000	0,2000	0,7110	A
42	0,0001	0,0018	0,0085	0,5000	0,2000	0,7103	A
41							
4	0,0016	0,0011	0,0042	0,5000	0,2000	0,7069	A
34							
4	0,0001	0,0001	0,0021	0,5000	0,2000	0,7023	A
2	0,0000	0,0962	0,0508	0,5000	0,0533	0,7003	A
11	0,0000	0,0776	0,0042	0,5000	0,1000	0,6818	A
5	0,0000	0,0664	0,0106	0,5000	0,1000	0,6770	A
29							
5	0,0009	0,0001	0,0042	0,5000	0,1667	0,6718	A
23							
0	0,0001	0,0001	0,0042	0,5000	0,1667	0,6711	A
24							
5	0,0001	0,0001	0,0042	0,5000	0,1667	0,6711	A
40							
7	0,0012	0,0001	0,0021	0,5000	0,1667	0,6701	A
8	0,0002	0,0057	0,1100	0,5000	0,0533	0,6692	A
19	0,0002	0,0012	0,0465	0,5000	0,1000	0,6479	A
12	0,0000	0,0026	0,0762	0,5000	0,0667	0,6454	A
41							
3	0,0001	0,0004	0,0063	0,5000	0,1333	0,6401	A
65	0,0002	0,0005	0,0360	0,5000	0,1000	0,6367	A
41							
2	0,0001	0,0005	0,0021	0,5000	0,1333	0,6361	A
3	0,0000	0,0465	0,0317	0,5000	0,0533	0,6316	A

Fuente: Elaboración propia

La clasificación ABC de los repuestos se realiza de la siguiente manera:

Ítems clase A: Son el 15% de los repuestos con mayor puntuación. Para un total de 62 repuestos.

Ítems clase B: Son el 25% de los repuestos siguientes. Para un total de 103.

Ítems clase C. Son el 60% de los repuestos restantes. Para un total de 249.

6.2. SISTEMAS DE PRONÓSTICOS

Una vez clasificados los repuestos, se procede con el desarrollo del sistema de pronósticos, que tiene como función principal prever el comportamiento de la demanda que se quiere satisfacer.

Con el fin de darle un alcance al presente proyecto se enfocarán los esfuerzos en los ítems clase A, que son los que tiene un mayor impacto en la problemática y su tratamiento puede reducir considerablemente los altos tiempos de inactividad de las máquinas. Los datos utilizados corresponden a la demanda mensual de los repuestos en los últimos 41 meses.

Para iniciar, se identificó el patrón de demanda de cada repuesto y se categorizaron como erráticos y no erráticos. De acuerdo a esto, se procedió con la aplicación de las técnicas de pronósticos. Para repuestos con demanda errática se utilizó la técnica de pronósticos de Croston y para repuestos con demanda no errática se utilizaron las técnicas del promedio móvil, suavización exponencial simple y suavización exponencial doble, seleccionando la que tenga un menor ECM, menor MAD y menor MAPE.

6.2.1. Patrón de demanda de los repuestos. Para identificar el patrón de demanda de los repuestos se utilizó la fórmula del coeficiente de variación de la demanda.

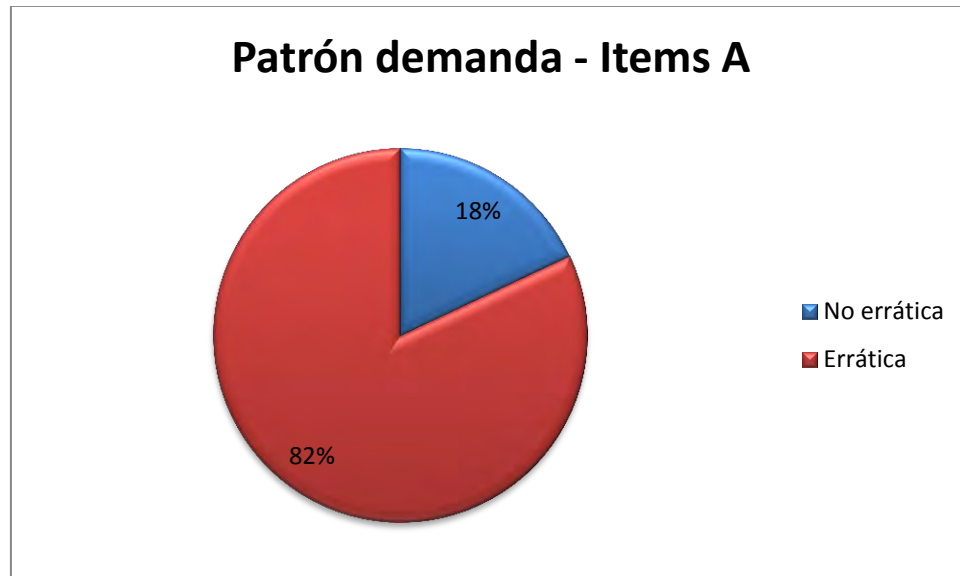
$$\text{Coeficiente de Variación de Demanda} = \frac{\text{Desviación Estandar de la Demanda}}{\text{Demanda Promedio}} \quad (18)$$

Categorizando como repuestos con demanda errática aquellos que tienen un coeficiente de variación mayor o igual a 1 y de lo contrario, se categorizaron como repuestos con demanda no errática.

Por ejemplo, el repuesto No. 11 es un repuesto con demanda no errática pues su coeficiente de variación es igual a 0,32. Mientras que, el repuesto No. 1 es un repuesto con demanda errática pues su coeficiente de variación es igual a 1,10.

En total, el 82% de los repuestos clase A tienen demanda errática y el 18% restante tienen demanda no errática. En la figura No. 5 se ilustra esta categorización.

Figura 3. Patrón de demanda Ítems A.



Fuente: Elaboración propia

6.2.2. Pronósticos para repuestos con demanda no errática. Para repuestos con demanda no errática se utilizaron las técnicas del promedio móvil, la suavización exponencial simple y la suavización exponencial doble, seleccionando como mejor opción aquella con menor ECM, MAD Y MAPE.

A continuación se presentan los cálculos obtenidos para el repuesto No. 11.

- **Promedio Móvil**

Para el repuesto No. 11 se calculó el promedio móvil para un n igual 6 en donde el primer dato obtenido es aproximadamente igual a 88,67. La fórmula utilizada fue la No. 3 indicada en el marco teórico. De esta manera se siguieron realizando los pronósticos para los siguientes meses.

$$\text{Pronóstico mes 7} = \frac{80+87+90+85+92+98}{6} = 88,67 \approx 89 \text{ (19)}$$

El cuadro No. 13 presenta el sistema de pronóstico de promedio móvil para el repuesto No. 11 En donde el ECM es igual a 750,96, la MAD es igual a 22,43 y la la MAPE 15,31.

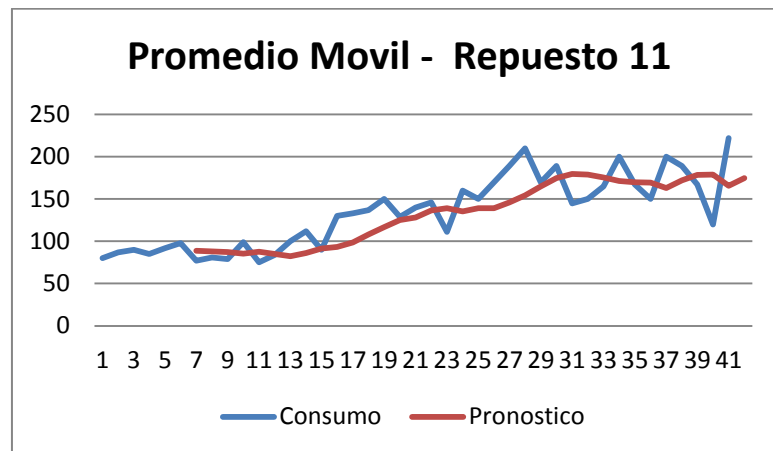
Cuadro 13. Sistema de Promedio Móvil – Repuesto No. 11

	PROMEDIO MÓVIL n = 6					
No.	Consumo	Pronósticos	Error	Error Abs	Error Cuad	Error porc
1	80					
2	87					
3	90					
4	85					
5	92					
6	98					
7	77	88,67	(11,67)	11,67	136	15,2
8	81	88,17	(7,17)	7,17	51	8,8
9	79	87,17	(8,17)	8,17	67	10,3
10	99	85,33	13,67	13,67	187	13,8
11	75	87,67	(12,67)	12,67	160	16,9
12	84	84,83	(0,83)	0,83	1	1,0
13	100	82,50	17,50	17,50	306	17,5
14	112	86,33	25,67	25,67	659	22,9
15	90	91,50	(1,50)	1,50	2	1,7
16	130	93,33	36,67	36,67	1.344	28,2
17	133	98,50	34,50	34,50	1.190	25,9
18	137	108,17	28,83	28,83	831	21,0
19	150	117,00	33,00	33,00	1.089	22,0
20	129	125,33	3,67	3,67	13	2,8
21	140	128,17	11,83	11,83	140	8,5
22	146	136,50	9,50	9,50	90	6,5

23	111	139,17	(28,17)	28,17	793	25,4
24	160	135,50	24,50	24,50	600	15,3
25	150	139,33	10,67	10,67	114	7,1
26	170	139,33	30,67	30,67	940	18,0
27	189	146,17	42,83	42,83	1.835	22,7
28	210	154,33	55,67	55,67	3.099	26,5
29	170	165,00	5,00	5,00	25	2,9
30	189	174,83	14,17	14,17	201	7,5
31	145	179,67	(34,67)	34,67	1.202	23,9
32	150	178,83	(28,83)	28,83	831	19,2
33	165	175,50	(10,50)	10,50	110	6,4
34	200	171,50	28,50	28,50	812	14,3
35	167	169,83	(2,83)	2,83	8	1,7
36	150	169,33	(19,33)	19,33	374	12,9
37	200	162,83	37,17	37,17	1.381	18,6
38	189	172,00	17,00	17,00	289	9,0
39	167	178,50	(11,50)	11,50	132	6,9
40	120	178,83	(58,83)	58,83	3.461	49,0
41	222	165,50	56,50	56,50	3.192	25,5
42		174,67				
	MAD - ECM - MAPE			22,43	750,96	15,31

Fuente:Elaboración propia

Figura 4. Consumo y pronóstico promedio móvil para repuesto No. 11



Fuente: Elaboración propia

La selección del valor n se realizó mediante iteraciones que varían a n desde 6 hasta 15, pues de acuerdo a Vidal (2010), dentro de este rango se encuentra el n que arroja el pronóstico con menor ECM, menor MAD y menor MAPE.

El cuadro No. 14 presenta los resultados de las iteraciones realizadas, en donde $n = 6$ es el que tiene menor valor.

Cuadro 14. Resultados Iteraciones de n

n	MAD	ECM	MAPE
6	22,43	750,96	15,31
7	23,00	758,10	15,64
8	23,67	788,77	15,94
9	24,77	840,73	16,50

Fuente: Elaboración propia

- **Suavización Exponencial Simple**

El pronóstico para suavización exponencial simple se realizó con un valor de α igual a 0.3, el cual se obtuvo mediante la herramienta solver de Excel, variando el valor de α entre 0.01 y 0.3 de manera que se obtenga el menor ECM, menor MAD y menor MAPE.

El valor de inicialización del pronóstico se obtuvo con el promedio de los últimos 19 meses. Los siguientes pronósticos se obtuvieron con la fórmula No. 4 indicada

en el marco de referencia. A continuación el cálculo de los pronóstico del mes 20 y 21.

$$S_{20} = \frac{80+87+90+85+92+98+77+81+79+75+84+100+112+90+130+133+137+150}{19} = 98,89 \text{ (20)}$$

$$S_{21} = (0.3 * 129) + ((1 - 0.3) * 107,93) = 107,93 \quad (21)$$

El cuadro No. 15 presenta el sistema de pronóstico de suavización exponencial simple para el repuesto No. 11 En donde el ECM es igual a 1006, la MAD 27,44 y la MAPE 16,85.

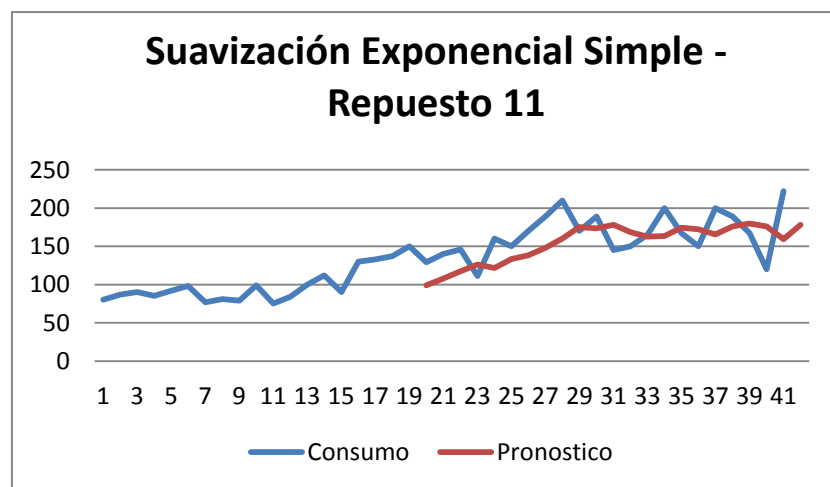
Cuadro 35.Sistema de Suavización Exponencial Simple – Repuesto No. 11

	SUAVIZACIÓN SIMPLE $\alpha = 0.30$					
No.	Consumo	Pronósticos	Error	Error Abs	Error Cuad	Error porc
1	80					
2	87					
3	90					
4	85					
5	92					
6	98					
7	77					
8	81					
9	79					
10	99					
11	75					
12	84					
13	100					
14	112					
15	90					
16	130					
17	133					
18	137					
19	150					
20	129	98,89	30,11	30,11	906	23,3
21	140	107,93	32,07	32,07	1.029	22,9
22	146	117,55	28,45	28,45	809	19,5
23	111	126,08	(15,08)	15,08	228	13,6
24	160	121,56	38,44	38,44	1.478	24,0

25	150	133,09	16,91	16,91	286	11,3
26	170	138,16	31,84	31,84	1.014	18,7
27	189	147,71	41,29	41,29	1.704	21,8
28	210	160,10	49,90	49,90	2.490	23,8
29	170	175,07	(5,07)	5,07	26	3,0
30	189	173,55	15,45	15,45	239	8,2
31	145	178,18	(33,18)	33,18	1.101	22,9
32	150	168,23	(18,23)	18,23	332	12,2
33	165	162,76	2,24	2,24	5	1,4
34	200	163,43	36,57	36,57	1.337	18,3
35	167	174,40	(7,40)	7,40	55	4,4
36	150	172,18	(22,18)	22,18	492	14,8
37	200	165,53	34,47	34,47	1.188	17,2
38	189	175,87	13,13	13,13	172	6,9
39	167	179,81	(12,81)	12,81	164	7,7
40	120	175,97	(55,97)	55,97	3.132	46,6
41	222	159,18	62,82	62,82	3.947	28,3
42		178,02				
MAD - ECM - MAPE				27,44	1.006,12	16,85

Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Consumo y suavización exponencial simple - repuesto No. 11



Fuente: Elaboración propia

- ***Suavización Exponencial Doble***

Para hallar los datos de inicio del pronóstico con suavización exponencial doble para el repuesto 11, se identificaron los valores de $\hat{a}_1(0)$, que representa una primera estimación del corte con el eje y, referida al tiempo cero de los datos utilizados para la inicialización. $\hat{b}_1(0)$, que es la estimación del valor constante alcanzado por la demanda, determinado con base en la regresión lineal de datos históricos y $\hat{b}_2(0)$ que representa la pendiente de la tendencia de la demanda.

Los valores de los parámetros descritos anteriormente, se calcularon tomando los datos históricos de la demanda y utilizando las siguientes fórmulas en Excel.

$$\hat{a}_1(0) = \text{INTERSECCIÓN.EJE}(\text{periodo de tiempo; consumo}) \approx 68,8 \quad (21)$$

P. tiempo.	Consumo
1	80
2	87
3	90
4	85
5	92
6	98
7	77
8	81
9	79
10	99
11	75
12	84
13	100
14	112
15	90
16	130
17	133
18	137
19	150

$$\hat{b}_2(0) = \text{ESTIMACION.LINEAL}(\text{consumo}) \approx 3 \quad (22)$$

$$\hat{b}_1(0) = \hat{a}_1(0) + m\hat{b}_2(0) = 68,8 - 3(19) \approx 126 \quad (23)$$

Donde m es igual al número de periodos históricos utilizados para calcular $\hat{a}_1(0)$ y $\hat{b}_2(0)$.

Una vez hallados estos valores se procede con el cálculo de los valores iniciales y valores del pronóstico.

– Valores Iniciales

Los valores de iniciación del pronóstico se calcularon con las formulas 8 y 9 referenciadas en el marco teórico. Tomando un valor de α igual a 0.01, el cual se obtuvo mediante la herramienta solver de Excel, variando el valor de α entre 0.01 y 0.3 de manera que se obtenga el menor ECM, la menor MAD y la menor la MAPE.

$$S_0 = 126 - \left(\frac{1-0.01}{0.01} \right) (3) \approx 172,37 \quad (24)$$

$$S_0^2 = 126 - 2 \left(\frac{1-0.01}{0.01} \right) (3) \approx 470,76 \quad (25)$$

Para los demás valores de S_t y S_t^2 se deben utilizar las formulas No. 6 y 7 referenciadas en el marco teórico.

– Valores de pronóstico

Los valores del pronóstico se calcularon con la fórmula 5 del marco teórico.

$$\hat{X}_{(t)} = 2 + \frac{0.01}{(1-0.01)} 172,37 - \left(1 + \frac{0.01}{(1-0.01)} \right) 470,76 \approx 129,04 \quad (26)$$

El cuadro No. 16 presenta el sistema de pronóstico de suavización exponencial doble para el repuesto No. 11 En donde el ECM es igual a 748,11, la MAD es 21,79 y la MAPE es 13,62.

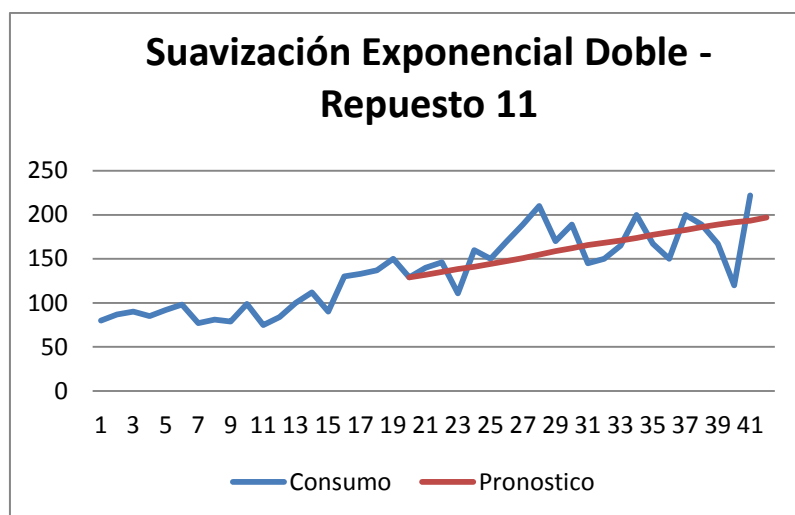
Cuadro 16. Sistema de Suavización Exponencial Doble – Repuesto No. 11

	SUAVIZACIÓN EXPONENCIAL DOBLE $\alpha = 0.01$							
No.	Consumo	ST	S_T^2	Pronóstico	Error	Error Abs	Error Cuad	Error porc
1	80							
2	87							
3	90							
4	85							
5	92							
6	98							
7	77							
8	81							
9	79							
10	99							
11	75							
12	84							
13	100							
14	112							
15	90							
16	130							
17	133							
18	137							
19	150	(172,37)	(470,76)					
20	129	(169,35)	(467,74)	129,04	(0,04)	0,04	0	0,0
21	140	(166,26)	(464,73)	132,05	7,95	7,95	63	5,7
22	146	(163,14)	(461,71)	135,22	10,78	10,78	116	7,4
23	111	(160,40)	(458,70)	138,45	(27,45)	27,45	754	24,7
24	160	(157,19)	(455,68)	140,92	19,08	19,08	364	11,9
25	150	(154,12)	(452,67)	144,31	5,69	5,69	32	3,8
26	170	(150,88)	(449,65)	147,44	22,56	22,56	509	13,3
27	189	(147,48)	(446,63)	150,91	38,09	38,09	1.451	20,2
28	210	(143,91)	(443,60)	154,69	55,31	55,31	3.059	26,3
29	170	(140,77)	(440,57)	158,82	11,18	11,18	125	6,6
30	189	(137,47)	(437,54)	162,07	26,93	26,93	725	14,2
31	145	(134,65)	(434,51)	165,63	(20,63)	20,63	426	14,2
32	150	(131,80)	(431,49)	168,25	(18,25)	18,25	333	12,2
33	165	(128,83)	(428,46)	170,92	(5,92)	5,92	35	3,6
34	200	(125,54)	(425,43)	173,83	26,17	26,17	685	13,1
35	167	(122,62)	(422,40)	177,38	(10,38)	10,38	108	6,2
36	150	(119,89)	(419,38)	180,20	(30,20)	30,20	912	20,1
37	200	(116,69)	(416,35)	182,62	17,38	17,38	302	8,7

38	189	(113,63)	(413,32)	185,99	3,01	3,01	9	1,6
39	167	(110,83)	(410,30)	189,08	(22,08)	22,08	488	13,2
40	120	(108,52)	(407,28)	191,67	(71,67)	71,67	5.136	59,7
41	222	(105,22)	(404,26)	193,26	28,74	28,74	826	12,9
42				196,85				
		MAD - ECM - MAPE				21,79	748,11	13,62

Fuente: Elaboración propia

Figura 6. Consumo y suavización exponencial Doble - repuesto No. 11



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el cuadro 17 para el repuesto número 11 el sistema de pronóstico con menor ECM, menor MAD y menor MAPE es la suavización exponencial doble. Siendo esta la mejor opción de pronóstico, pues el patrón de demanda del repuesto es creciente.

Cuadro 17. Comparación Indicadores de Pronósticos, Repuesto 11.

Repuesto 11	MAD	ECM	MAPE
Promedio móvil	22,43	750,96	15,31
Suavización exponencial Simple	27,44	1006,12	16,85
Suavización exponencial doble	21,79	748,11	13,62

- **Señal de rastreo**

Con el fin de identificar las posibles desviaciones, sesgos y problemas del sistema de pronósticos seleccionado, se calculó la señal de rastreo.

El cálculo de la señal de rastreo se realizó a partir de los errores suavizados tal como lo propone Vidal en su libro Fundamentos de Control y Gestión de Inventarios. A continuación los pasos realizados para calcular la señal de rastreo.

Calculo de la regresión de la demanda y los residuos. Para el cálculo de la señal de rastreo es necesario iniciar obteniendo los valores de la regresión de la demanda y los residuos. A continuación los cálculos realizados para el periodo 1.

$$\text{Reg.Demanda}(T) = \hat{a}_1(1) + \hat{b}_2(1) * \text{periodo de tiempo } T.$$

Donde;

$$\hat{a}_1(1) = \text{INTERSECCION.EJE}(\text{periodo de tiempo; consumo}) \approx 68.75$$

$$\hat{b}_2(1) = \text{ESTIMACION.LINEAL}(\text{consumo}) \approx 3,01$$

$$\text{Reg. Demanda}(1) = 68.75 + 3,01 * 1$$

$$\text{Reg. Demanda}(1) = 71.77$$

Calculo Error Suavizado Q(T). Para calcular el error suavizado se debe definir la constante w, que en este caso será igual 0,10 pues es el valor más comúnmente utilizado.⁴⁸

A continuación los cálculos para el periodo de tiempo 2, ya que en el periodo 1 el valor siempre es 0. La fórmula utilizada es la No 14, indicada en el marco teórico

$$Q(T) = we(T) + (1-w)Q(T - 1)$$

$$Q(20) = 0.1(0.04) + (1-0,1)(0)$$

$$Q(20) = 0.004$$

Dónde:

e(T) = error del pronóstico.

Q(T - 1) = error suavizado en el tiempo anterior.

Calculo MAD suavizada. Se calcula a partir de la MAD inicial que se obtiene a partir de la formula No 19, indicada en el marco teórico.

⁴⁸VIDAL Carlos Julio. Fundamentos de Control y Gestión de Inventarios. ed:Programa Editorial Universidad Del Valle, 2010.

$$MAD(0) = 0.8 \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{41} (x_t - \hat{x}_t)^2}{41-2}} \left(\sqrt{1 + \frac{\alpha}{(1+\beta)^3} [(1 + 4\beta + 5\beta^2) + 2\alpha\tau(1 + 3\beta) + 2\alpha^2\tau^2]}; \beta = 1 - \alpha \right)$$

$$MAD(0) = 11.91$$

Dónde:

x_t = es la demanda en el periodo de tiempo t

\hat{x}_t = Reg. Demanda en el periodo de tiempo t

α = constante del pronóstico calculada con el solver de Excel

$$\beta = 1 - \alpha$$

Una vez calculada la MAD inicial, la MAD suavizada para los siguientes periodos se calcula con la formula No 15 utilizada en el marco teorico.

$$MAD(T) = w |e(T)| + (1-w)MAD(T-1)$$

$$MAD(20) = 0.1(0.04) + (1-0.1)*11.91$$

$$MAD(20) = 10.72$$

Dónde:

$|e(T)|$ = error del pronóstico absoluto

$MAD(T-1)$ = MAD en el periodo de tiempo anterior

Calculo Señal de Rastreo. Para calcular la señal de rastrea se utilizó la formula No 19, utilizada en el marco teórico.

$$\text{Señal de rastreo (T)} = \frac{Q(T)}{MAD(T)}$$

$$\text{Señal de rastreo (21)} = \frac{0.79}{10.72}$$

$$\text{Señal de rastreo (21)} = 0.08$$

Cuadro 48. Calculo Señal de Rastreo

SUAVIZACIÓN EXPONENCIAL DOBLE $\alpha = 0.01$						Dem. Regresión	Residuos			
No.	Consumo	Pronóstico	Error	Error Abs	Error porc			Error Suav Q(T)	MAD Suav MAD(T)	Señal Rastreo Q(T)/MAD
1	80					71,77	8,23	0	11,91	
2	87					74,78	12,22	(0,004)	10,72	0,00
3	90					77,80	12,20	0,79	10,44	0,08
4	85					80,81	4,19	1,79	10,48	0,17
5	92					83,82	8,18	(1,13)	12,17	0,09
6	98					86,84	11,16	0,89	12,87	0,07
7	77					89,85	(12,85)	1,37	12,15	0,11
8	81					92,87	(11,87)	3,49	13,19	0,26
9	79					95,88	(16,88)	6,95	15,68	0,44
10	99					98,89	0,11	11,78	19,64	0,60
11	75					101,91	(26,91)	11,60	19,61	0,59
12	84					104,92	(20,92)	11,89	20,34	0,58
13	100					107,94	(7,94)	8,64	20,37	0,42
14	112					110,95	1,05	5,95	20,16	0,30
15	90					113,96	(23,96)	4,76	18,74	0,25
16	130					116,98	13,02	6,90	19,48	0,35
17	133					119,99	13,01	5,18	18,57	0,28
18	137					123,01	13,99	1,64	19,73	0,08
19	150							3,21	19,50	0,16
20	129	129,04	(0,04)	0,04	0,0			3,19	17,85	0,18
21	140	132,05	7,95	7,95	5,7			0,66	18,27	0,04
22	146	135,22	10,78	10,78	7,4			(6,57)	23,61	0,28
23	111	138,45	(27,45)	27,45	24,7			(3,04)	24,12	0,13
24	160	140,92	19,08	19,08	11,9			(2,73)	21,71	0,13
25	150	144,31	5,69	5,69	3,8					
26	170	147,44	22,56	22,56	13,3					
27	189	150,91	38,09	38,09	20,2					
28	210	154,69	55,31	55,31	26,3					
29	170	158,82	11,18	11,18	6,6					
30	189	162,07	26,93	26,93	14,2					
31	145	165,63	(20,63)	20,63	14,2					
32	150	168,25	(18,25)	18,25	12,2					
33	165	170,92	(5,92)	5,92	3,6					
34	200	173,83	26,17	26,17	13,1					
35	167	177,38	(10,38)	10,38	6,2					
36	150	180,20	(30,20)	30,20	20,1					
37	200	182,62	17,38	17,38	8,7					
38	189	185,99	3,01	3,01	1,6					
39	167	189,08	(22,08)	22,08	13,2					
40	120	191,67	(71,67)	71,67	59,7					
41	222	193,26	28,74	28,74	12,9					
42		196,85								
		MAD - ECM - MAPE		21,79	13,62					

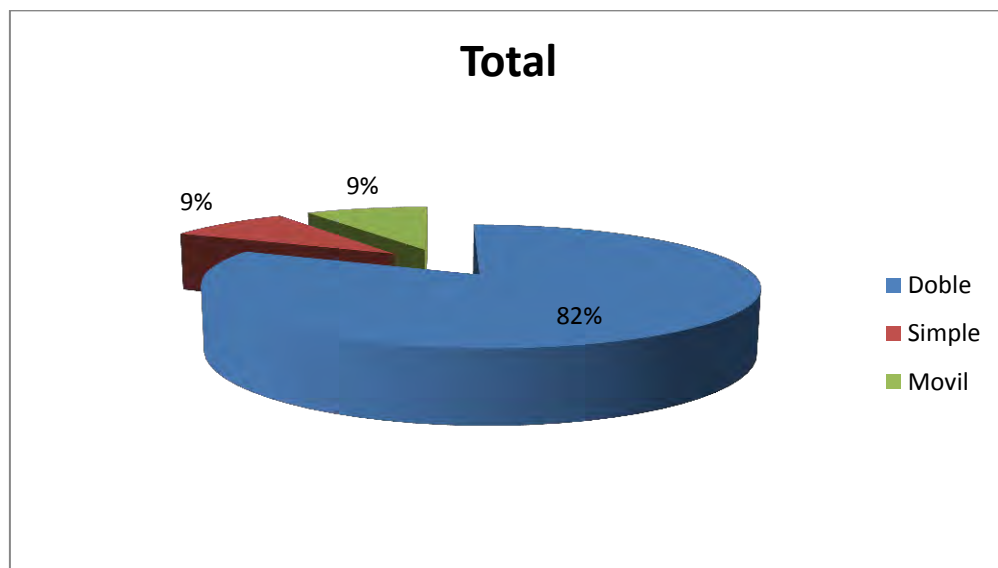
Como se puede observar la señal de rastreo en los periodos de tiempos pronosticados, toma valores inferiores a 0.6 por lo cual se puede concluir que el pronóstico utilizado es adecuado para predecir la demanda del repuesto 11.

6.3. RESUMEN DE RESULTADOS

A continuación se presenta una gráfica resumen de los resultados obtenidos al pronosticar todos los repuestos con demanda no errática. Como conclusión, en el 82% de los repuestos gana la técnica de suavización exponencial doble, esta es escogida por tener el menor ECM, MAD y MAPE. En el 9% de los repuestos se seleccionó la técnica suavización exponencial simple y el 9% restante se seleccionó el promedio móvil.

Para todos los repuestos con demanda no errática se calculó la señal de rastreo en el sistema de pronóstico seleccionado, la cual no supero el 0,6, por lo cual se concluye que los sistemas de pronósticos escogidos son adecuados para el patrón de demanda de los ítems seleccionados.

Figura 7. Resumen Resultados Pronósticos



Fuente: Elaboración propia

6.3.1. Pronósticos para repuestos con demanda errática

Para repuestos con demanda errática se utilizó el sistema de pronóstico de Croston, pues como se mencionó en el marco teórico este método es el que mejor resultado ofrece para este tipo de demanda.

Los datos de inicialización se hallaron con los primeros 19 datos históricos del consumo de los repuestos, calculando los contadores n_o y $n_{o(2)}$ donde:

7. n_o = Si hay demanda en ese periodo se coloca uno, si no, es la cantidad de periodos desde que ocurrió la última demanda mayor a cero.
8. $n_{o(2)}$ = Es la suma del número de periodos entre demanda positivas. Si n_o es igual a 1 se indica el valor n_o del periodo anterior de lo contrario se pone cero.

A continuación se presenta los datos de los contadores para el repuesto No. 1.

Cuadro 19. Contadores de Inicialización – Croston para repuesto No. 1.

No.	Consumo	n_o	$n_{o(2)}$
1	600	1	
2	0	2	0
3	280	1	2
4	0	2	0
5	320	1	2
6	0	2	0
7	150	1	2
8	0	2	0
9	410	1	2
10	0	2	0
11	0	3	0
12	315	1	3
13	0	2	0
14	0	3	0
15	380	1	3
16	0	2	0
17	490	1	2
18	0	2	0
19	120	1	2

Fuente: Elaboración propia

Una vez hallados los contadores se calculan los valores de \hat{n}_O y \hat{z}_O donde:

$$\hat{n}_O = \text{Promedio de } n_{o(2)} \text{ mayores a 0} = \frac{2+2+2+2+3+3+2+2}{8} \approx 2.25 \quad (27)$$

$$\hat{z}_O = \text{Promedio de consumos mayores a 0} = \frac{600+280+320+150+410+315+380+490+120}{9} \approx 340.56 \quad (28)$$

Para los valores de \hat{n}_{20} y \hat{z}_{20} se utilizan las formulas No. 11 y No. 12 indicadas en el marco teórico. Solo se deben calcular estos valores cuando la demanda es mayor a cero, de lo contrario no se realiza ninguna actualización para \hat{n}_{20} y \hat{z}_{20} . El

valor de α para este caso es igual a 0.3 y se calculó utilizando el solver de Excel variando los valores entre 0.01 y 0.3.

$$\hat{n}_{20} = \alpha n_{20} + (1 - \alpha)\hat{n}_{19} = 0.3(1) + (1 - 0.3)(2.25) = 1.88 \quad (29)$$

$$\hat{z}_{20} = \alpha x_{20} + (1 - \alpha)\hat{z}_{19} = 0.3(210) + (1 - 0.3)(340.56) = 301.39 \quad (30)$$

Como en el periodo 21 el consumo es igual a cero, no se realiza ninguna actualización para \hat{n}_{21} y \hat{z}_{21} siendo estos iguales a 1.88 y 301.39 respectivamente.

Por último el valor del pronóstico se calcula con la fórmula 13 indicada en el marco teórico. A continuación se presentan el valor hallado para el periodo 20.

$$\hat{x}_{20} = \frac{\hat{z}_{19}}{\hat{n}_{19}} = \frac{340.56}{2.25} = 151.36 \quad (31)$$

El cuadro No. 20 presenta el sistema de pronóstico de Croston para el repuesto No. 1 en donde el ECM es igual a 65.364,84 y la MAD ES 205.72. En este caso no se calculó el valor de la MAPE ya que este indicador no es una buena métrica cuando se está trabajando con repuestos para demanda errática, pues en una gran cantidad de periodos la demanda es igual a cero.

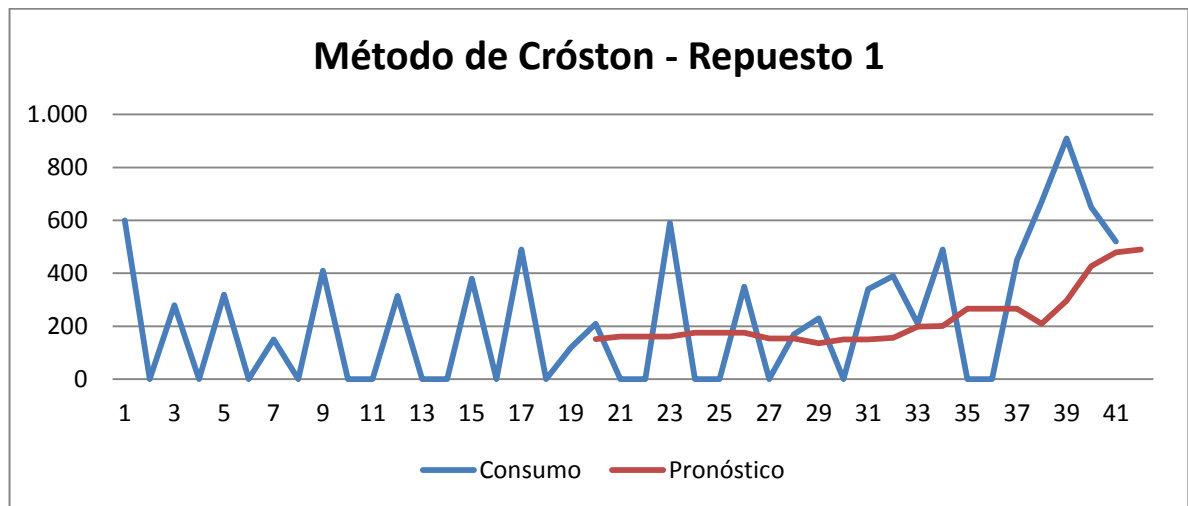
Cuadro 20. Métodos de Croston – Repuesto No. 1

	nPromedio	zPromedio	Contador	Pronóstico	Error et	Error Abs	Error Cuad
19	2,25	340,56					
20	1,88	301,39	1	151,36	58,64	58,64	3.438,88
21	1,88	301,39	1	160,74	-160,74	160,74	25.837,59
22	1,88	301,39	2	160,74	-160,74	160,74	25.837,59
23	2,21	387,97	3	160,74	429,26	429,26	184.263,51
24	2,21	387,97	1	175,35	-175,35	175,35	30.749,26
25	2,21	387,97	2	175,35	-175,35	175,35	30.749,26
26	2,45	376,58	3	175,35	174,65	174,65	30.500,99
27	2,45	376,58	1	153,78	-153,78	153,78	23.649,77

					153,78		
28	2,31	314,61	2	153,78	16,22	16,22	262,93
29	1,92	289,22	1	135,95	94,05	94,05	8.845,31
					-		
30	1,92	289,22	1	150,65	150,65	150,65	22.694,39
					189,35		
31	1,94	304,46	2	150,65	189,35	189,35	35.854,72
					233,38		
32	1,66	330,12	1	156,62	233,38	233,38	54.466,18
33	1,46	294,08	1	198,78	11,22	11,22	125,93
					288,92		
34	1,32	352,86	1	201,08	288,92	288,92	83.474,69
					-		
35	1,32	352,86	1	266,56	266,56	266,56	71.052,62
					-		
36	1,32	352,86	2	266,56	266,56	266,56	71.052,62
					183,44		
37	1,83	382,00	3	266,56	183,44	183,44	33.651,34
					460,87		
38	1,58	468,40	1	209,13	460,87	460,87	212.402,73
					613,29		
39	1,41	600,88	1	296,71	613,29	613,29	376.123,77
					222,34		
40	1,28	615,62	1	427,66	222,34	222,34	49.436,25
41	1,20	586,93	1	479,63	40,37	40,37	1.630,11
42	489,73						
MAD Y ECM						205,72	65.364,84

Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Consumo y Método de Croston - repuesto No. 1



Fuente: Elaboración propia

Para los repuestos con demanda errática el mejor método de pronóstico es el de Croston pues fue diseñado especialmente para este tipo demanda y ofrece resultados satisfactorios.

6.3.2. Señal de rastreo

El cálculo de la señal de rastreo en los repuestos con demanda errática se realizó de igual manera que en los repuestos con demanda no errática.

A continuación se presenta el cuadro No 21. Calculo de la Señal de Rastreo el repuesto 1.

Cuadro 21. Calculo de la Señal de Rastreo para el Repuesto 1

No.	Consumo					Dem. Regresión	Residuos			
1	600					-9,75	609,75			
2	0					-14,63	14,63			
3	280					-19,51	299,51			
4	0					-24,39	24,39			
5	320					-29,26	349,26			
6	0					-34,14	34,14			
7	150					-39,02	189,02			
8	0					-43,89	43,89			
9	410					-48,77	458,77			
10	0					-53,65	53,65			
11	0					-58,53	58,53			
12	315					-63,40	378,40			
13	0					-68,28	68,28			
14	0					-73,16	73,16			
15	380					-78,04	458,04			
16	0					-82,91	82,91		Constante w	0,1
17	490					-87,79	577,79		Constante C1	1,50181152
18	0	Pronostico	Error et	Error abs	Error cuad	-92,67	92,67	Error Suav	MAD Suav	Señal Rastreo
19	120					-97,54	217,54	Q(T)	MAD(T)	Q(T)/MAD
20	210,00	151,36	58,64	58,64	3.438,88			0,00	609,85	0,00
21	0,00	160,74	-160,74	160,74	25.837,59			5,86	554,73	0,01
22	0,00	160,74	-160,74	160,74	25.837,59			-10,80	515,33	0,02
23	590,00	160,74	429,26	429,26	184.263,51			-25,79	479,87	0,05
24	0,00	175,35	-175,35	175,35	30.749,26			19,71	474,81	0,04
25	0,00	175,35	-175,35	175,35	30.749,26			0,21	444,87	0,00
26	350,00	175,35	174,65	174,65	30.500,99			-17,35	417,92	0,04
27	0,00	153,78	-153,78	153,78	23.649,77			1,85	393,59	0,00
28	170,00	153,78	16,22	16,22	262,93			-13,71	369,61	0,04
29	230,00	135,95	94,05	94,05	8.845,31			-10,72	334,27	0,03
30	0,00	150,65	-150,65	150,65	22.694,39			-0,24	310,25	0,00
31	340,00	150,65	189,35	189,35	35.854,72			-15,28	294,29	0,05
32	390,00	156,62	233,38	233,38	54.466,18			5,18	283,79	0,02
33	210,00	198,78	11,22	11,22	125,93			28,00	278,75	0,10
34	490,00	201,08	288,92	288,92	83.474,69			26,32	252,00	0,10
35	0,00	266,56	-266,56	266,56	71.052,62			52,58	255,69	0,21
36	0,00	266,56	-266,56	266,56	71.052,62			20,67	256,78	0,08
37	450,00	266,56	183,44	183,44	33.651,34			-8,05	257,76	0,03
38	670,00	209,13	460,87	460,87	212.402,73			11,10	250,32	0,04
39	910,00	296,71	613,29	613,29	376.123,77			56,07	271,38	0,21
40	650,00	427,66	222,34	222,34	49.436,25			111,79	305,57	0,37
41	520,00	479,63	40,37	40,37	1.630,11			122,85	297,25	0,41
42	489,73									
		Total	1.506,27	4.525,74	1.376.100,46					
		MAD Y ECM		205,72	65.364,84					
		Desv. Estand		145,58	88.554,28					

Como se puede observar la señal de rastreo en los periodos de tiempos pronosticados, toma valores inferiores a 0.6 por lo cual se puede concluir que el pronóstico utilizado es adecuado para predecir la demanda del repuesto 1.

7. SISTEMA DE CONTROL

Una vez identificados los sistemas de pronósticos con menor ECM, menor MAD y menor MAPE para cada repuesto, se procedía determinar la política de control que permita saber cuándo revisar, cuánto comprar y qué cantidad, para ofrecer el nivel de servicio adecuado reduciendo los costos totales relevantes.

En todos los repuesto se aplicó la técnica de revisión continua (s,S) y la técnica de revisión periódica (R,S), seleccionando la que ofreciera un costo total relevante menor.

No se aplicó la técnica de revisión continua (s, Q), porque esta solo funciona adecuadamente siempre y cuando no exista más de un pedido de reposición pendiente en cualquier instante de tiempo, obteniendo un CTR mayor o igual a la técnica (s,S)

Por otro lado, es mejor implementar la política (R,S), ya que la política (R,s,S) es más difícil de comprender y aplicar, lo que la hace más susceptible de errores humanos.⁴⁹

7.1. Parámetros. Se calcularon los sistemas de control para todos los repuestos. A continuación los parámetros del repuestos No. 1.

Cuadro 22. Parámetros Sistema de Control – Repuestos 1

Datos		Valor
Demanda Mens. Pronost. (und/mes)	d	225,5
Error cuadrático medio	ECM	65.365
Desv. Estand. Errores	σ_1	255,67
Tiempo de Reposición (mes)	L	0,27
Valor Item (\$)	v	\$ 14.590
Costo de Ordenamiento (\$)	A	\$ 5.180
Costo de Mant. Inventario (\$)	r	2,1%
Nivel de Servicio Deseado	P_1	97,5%

Fuente: Elaboración propia

Los datos de la demanda mensual pronosticada, el tiempo de reposición y el valor de ítem se obtuvieron de la información suministrada por el ingenio a partir de datos históricos. El ECM y la desviación estándar de los errores se obtuvieron del sistema de pronóstico. Los demás parámetros se calcularon en compañía de colaboradores del ingenio, quienes con su experiencia y datos adicionales

⁴⁹VIDAL Op. Cit. p29.

brindaron un apoyo para obtener estos resultados. A continuación la forma como se halló cada uno.

Costos de Ordenamiento. Este dato fue suministrado por la compañía y se obtuvo multiplicando el tiempo total que se genera una solicitud de pedido en comprarse y enviar la orden de compra al proveedor, y se multiplico por el promedio de los salarios de las personas que intervinieron en el proceso.

Costo de Mantener Inventario. Este dato fue suministrado por el ERP de la compañía, entre mayor sea el costo del ítem mayor será el costo de mantenerlo.

Nivel de Servicio deseado. Para escoger este parámetro, todas las personas del ingenio que apoyaron este proyecto se pusieron de acuerdo y seleccionaron el valor que consideraban como mejor opción

La empresa no contaba con una cifra para los costos de faltantes, por lo tanto se dejó fuera del estudio, ya que el cálculo implicaba tomar en consideración diversos factores como el impacto en cosecha, el impacto en producción y demás, que por el momento no tienen métrica dentro de la empresa.

7.2. Sistema de Revisión Continuo (s, S). Los pasos realizados para el cálculo de esta política de control son: determinar el valor del Q, hallar el valor de s y de S y por último, identificar el costo total relevante.

7.2.1. Cálculo de Q

$$Q = EOQ = \sqrt{\frac{2AD}{vr}} = \sqrt{\frac{2(5.180)(273.9*12)}{(14.590*2.1\%)}} \approx 337 \quad (31)$$

7.2.2. Cálculo valor s y S

Inicialmente se calcula la desviación estándar con base en el tiempo de reposición.

$$\sigma_L = \sigma_1 \sqrt{L} = 255.67 \sqrt{0.27} \approx 132.85 \quad (32)$$

Se determina el factor de seguridad k para un nivel de servicio de 97.5%, con una fórmula de Excel.

$$k = \text{DISTR.NORM.ESTAND.INV}(0.975) = 1.96$$

Se calcula el inventario de seguridad (S_s) y la demanda estimada durante el tiempo de reposición (\widehat{X}_L).

$$SS = \sigma_L k = (132.85)(1.96) \approx 260.4$$

$$\widehat{X}_L = dL = (273.9)(0.27) \approx 73.96$$

Por último se obtienen los valores del punto de reorden s y los valores del nivel máximo S .

$$s = SS + \widehat{X}_L = 260.4 + 73.96 \approx 334$$

$$S = Q + s = 334 + 337 \approx 671$$

Por lo tanto, con esta política cada vez que el nivel de inventario llegue a 334, se ordenará un pedido con cantidad igual a 671 menos el inventario efectivo en el momento de la revisión. Con lo cual se obtendría una nivel de servicio de 97.5% con el inventario a la mano.

7.2.3. Cálculo Costo total Relevante

Se obtuvo sumando el costo de realizar un pedido más el costo de mantener inventario.

$$CTR = \frac{AD}{Q} + \frac{Q}{2} vr = \frac{(5.180)(273,9 * 12)}{337} + \frac{337}{2} (14.590)(2.1\%) \approx 50.524 + 50.547$$

$$\approx 101.070$$

7.2.4. Sistema de Revisión Periódico (R, S)

Para el sistema de revisión periódico se utilizó un costo de ordenamiento A' que es igual costo de ordenamiento A utilizado anteriormente, incrementado el costo de revisión de inventario, que para este caso es 15%.

Los pasos realizados para el cálculo de esta política de control son: determinar el valor del R , lo que indica cada cuanto se debe revisar el inventario, hallar el valor de S , el cual es el nivel máximo que debe subir el inventario del repuesto y por último, identificar el costo total relevante, se obtiene sumando el costo de realizar un pedido más el costo de mantener inventario.

7.2.5. Cálculo de R

$$R = \frac{EOQ}{D} = \frac{337}{(273.9)(12)} \approx 0.1025 \text{ años} * 12 \text{ meses} \approx 1.23 \text{ meses}$$

7.2.6. Cálculo de S

Inicialmente se calcula la desviación estándar con base en el tiempo de reposición.

$$\sigma_{R+L} = \sigma_1 \sqrt{R + L} = 255.67 \sqrt{0.27 + 1.23} \approx 322.3$$

Se determina el factor de seguridad k para un nivel de servicio de 97.5%, con una fórmula de Excel.

$$k = \text{DISTR.NORM.ESTAND.INV}(0.975) = 1.96$$

Se calcula el inventario de seguridad y la demanda estimada durante el tiempo de reposición.

$$\begin{aligned} SS &= \sigma_{R+L} k = (322.3)(1.96) \approx 631.7 \\ \widehat{X}_{R+L} &= d(R + L) = (273.9)(1.23 + 0.27) \approx 435.3 \end{aligned}$$

Por último se obtienen los valores de S.

$$S = SS + \widehat{X}_{R+L} = 631.7 + 435.3 \approx 1.067$$

Por lo tanto, la política es revisar el inventario cada 1.23 meses es decir, aproximadamente 1 mes y 1 semana y ordenar una cantidad igual a 1,067 unidades menos el inventario efectivo al momento de la revisión. Mediante este método, se conseguirá un nivel de servicio del 97.5%.

7.2.7. Cálculo Costo total Relevante

Se obtuvo sumando el costo de realizar un pedido más el costo de mantener inventario.

$$\begin{aligned} \text{CTR} &= \frac{A}{D} + \frac{DR}{2} \text{vr} = \frac{(5.180)}{(273,9 * 12)} + \frac{(273,9 * 12)(1.23)}{2} (14.590)(2.1\%) \\ &\approx 54.193 + 54.446 \approx 108.639 \end{aligned}$$

7.2.8. Comparación costos de Políticas de Control

Como se puede observar en los cálculos anteriores, la política con menor costo total relevante es la de revisión continua (s,S), pues presenta una diferencia en costos de aproximadamente 6.97% con respecto a la técnica (R,S). Al realizar la política de control de inventario para los demás repuestos, se obtuvo el mismo resultado. En el 100% de los mismos, la política con menor costo fue la de revisión continua (S,s). Por lo tanto esta es la política que se seguirá usando para todos los repuestos.

Esto ocurre generalmente porque “la técnica (R,S) presenta costos de mantenimiento del inventario mayores que aquellos sistemas continuos, ya que el nivel de inventario de seguridad requerido es mayor para garantizar el mismo nivel de servicio. Esto se da porque, entre un periodo de revisión y otro, no se tiene información acerca del inventario efectivo, pudiendo caer a niveles indeseables si no se tiene el inventario de seguridad adecuados y, por lo tanto, debe cubrir fluctuaciones de demanda para un tiempo igual al periodo de revisión R, más el tiempo L (R+L)”⁵⁰

⁵⁰ Ibíd. *Op. Cit.* p29.

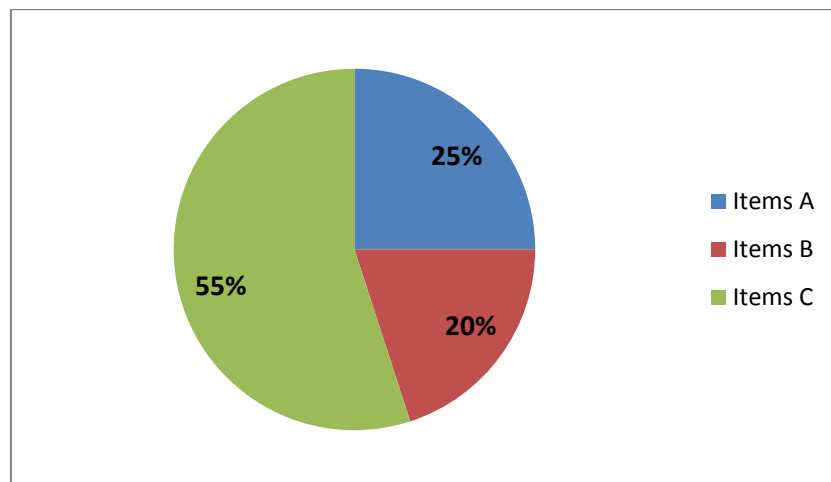
8. COMPARACIÓN SISTEMA DE CONTROL PROPUESTO Y ACTUAL

Con el fin de demostrar al ingenio los beneficios que se obtienen al implementar el sistema de control de inventarios presentado, se realizó una comparación entre el sistema de control actual y el sistema propuesto. Validando el impacto en los tiempos de inactividad y los costos de mantenimiento y administración del inventario.

8.1. IMPACTO EN TIEMPOS DE INACTIVIDAD

Para validar el impacto en los tiempos de inactividad de las máquinas se realizó una identificación de los ítems controlados actualmente por la empresa y se encontró la distribución de la figura No. 11.

Figura 9.Comparación de los ítems controlados – Sistema Actual



Fuente: Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, el 55% de los ítems controlados son clase C, lo que indica que se están orientando esfuerzos, tiempo y dinero por controlar aquellos ítems que de acuerdo a la clasificación realizada inicialmente, no son críticos ni tienen un impacto significativo al momento de realizar las reparaciones y mantenimientos. Mientras que sólo se controla el 25% de los ítems clase A, dejando por fuera un 75% de repuestos que son críticos y se deben controlar a fin de garantizar la disponibilidad oportuna de repuestos en el taller agrícola.

Esta situación explica por qué hay altos niveles de inventarios en el taller y sin embargo se presenta altos tiempos de inactividad de las cosechadoras, pues se están controlando gran cantidad de ítems clase C, lo cual solo aumenta los costos de mantenimiento y no mejora el nivel de servicio. Adicionalmente, se está dejando por fuera un alto porcentaje de ítems clase A que son críticos para las reparaciones y que al no controlarse generarán un impacto mayor en los tiempos de inactividad.

Los ítems clase A identificados se compararon con los repuestos urgentes comprados por paros en las cosechadoras y el 80% de los ítems comprados por urgencia hacen parte de los ítems clase A, el 14% de los clase B y solo el 6% de los clase C. Lo que demuestra que si se hubieran controlado aquellos ítems clase A los tiempos de inactividad de las cosechadoras se reducirían considerablemente.

8.2. IMPACTO EN COSTOS

Para evaluar el impacto en los costos, se compararon los niveles máximos de inventario que actualmente utiliza el ingenio y los niveles máximos obtenidos con la propuesta, para así identificar cual propone el costo menor de mantenimiento de inventario. Adicionalmente, se realizó una comparación entre el CTR del sistema de control utilizado y el propuesto.

8.2.1. Comparación de Niveles Máximos

Al comparar los valores máximos, se muestra que la propuesta plantea menores niveles de inventario, garantizando un nivel de servicio del 97.5% con costos menores en un 40%, que en dinero serían ahorros de aproximadamente \$ 200 MM. La tabla No. 22 presenta la comparación de los valores máximos del sistema actual versus el propuesto, se ordena de mayor a menor de acuerdo al porcentaje.

Cuadro 23.Comparaciónvalores máximos sistema actual vs Propuesto

No.	Valor Item	S actual	S propuesto	Valor Inv Actual	Valor Inv Propuesto	Comparación
108	\$ 339.820	25	5	\$ 8.495.508	\$ 1.685.303	80%
44	\$ 1.036.916	30	7	\$ 31.107.490	\$ 7.232.964	77%
32	\$ 90.053	50	12	\$ 4.502.667	\$ 1.072.180	76%
230	\$ 205.746	12	3	\$ 2.468.952	\$ 625.443	75%
163	\$ 364.012	15	5	\$ 5.460.180	\$ 1.750.169	68%
219	\$ 679.000	10	3	\$ 6.790.000	\$ 2.321.627	66%
363	\$ 4.967.712	4	2	\$ 19.870.848	\$ 7.727.560	61%
33	\$ 64.526	65	26	\$ 4.194.190	\$ 1.698.865	59%
84	\$ 20.739	50	21	\$ 1.036.925	\$ 430.753	58%
42	\$ 84.668	64	27	\$ 5.418.752	\$ 2.287.620	58%
61	\$ 146.869	20	9	\$ 2.937.380	\$ 1.269.230	57%
54	\$ 606.450	15	7	\$ 9.096.745	\$ 4.083.176	55%
179	\$ 6.168.362	5	2	\$ 30.841.808	\$ 13.896.309	55%
14	\$ 237.733	20	10	\$ 4.754.657	\$ 2.313.527	51%
342	\$ 10.325.017	6	5	\$ 61.950.102	\$ 47.053.575	24%
308	\$ 12.003.706	3	2	\$ 36.011.118	\$ 18.616.553	48%
320	\$ 1.159.114	3	2	\$ 3.477.342	\$ 1.803.068	48%
367	\$ 10.428.132	3	2	\$ 31.284.396	\$ 16.221.555	48%
380	\$ 1.205.200	3	2	\$ 3.615.600	\$ 1.874.757	48%
398	\$ 13.984.589	3	2	\$ 41.953.767	\$ 21.753.827	48%
95	\$ 282.519	10	5	\$ 2.825.190	\$ 1.472.645	48%
295	\$ 1.350.000	3	2	\$ 4.050.000	\$ 2.158.285	47%
12	\$ 40.462	48	27	\$ 1.942.187	\$ 1.076.568	45%
407	\$ 1.896.586	3	2	\$ 5.689.758	\$ 3.300.097	42%
245	\$ 205.746	5	3	\$ 1.028.730	\$ 605.768	41%
19	\$ 327.507	18	11	\$ 5.895.134	\$ 3.609.405	39%
344	\$ 78.542	6	4	\$ 471.252	\$ 300.335	36%
140	\$ 1.049.957	3	2	\$ 3.149.871	\$ 2.019.498	36%
28	\$ 119.513	17	11	\$ 2.031.723	\$ 1.319.172	35%
412	\$ 119.513	17	11	\$ 2.031.723	\$ 1.319.172	35%
8	\$ 366.506	18	13	\$ 6.597.112	\$ 4.610.419	30%
48	\$ 107.732	25	17	\$ 2.693.300	\$ 1.832.128	32%
414	\$ 107.732	25	17	\$ 2.693.300	\$ 1.832.128	32%
7	\$ 1.941	450	309	\$ 873.450	\$ 599.465	31%
117	\$ 339.358	5	3	\$ 1.696.790	\$ 1.170.103	31%
9	\$ 2.558	410	297	\$ 1.048.780	\$ 760.342	28%
201	\$ 12.090.000	4	3	\$ 48.360.000	\$ 35.156.972	27%
23	\$ 350.313	18	13	\$ 6.305.639	\$ 4.613.499	27%
27	\$ 225.561	20	15	\$ 4.511.220	\$ 3.362.215	25%
5	\$ 2.166	461	393	\$ 998.526	\$ 852.088	15%
29	\$ 121.862	24	18	\$ 2.924.683	\$ 2.207.401	25%
68	\$ 158.094	18	14	\$ 2.845.683	\$ 2.203.345	23%
45	\$ 121.784	18	14	\$ 2.192.112	\$ 1.717.579	22%
189	\$ 1.194.967	3	2	\$ 3.584.901	\$ 2.813.546	22%
94	\$ 2.935.976	5	4	\$ 14.679.880	\$ 11.743.904	20%
113	\$ 1.327.947	6	5	\$ 7.967.682	\$ 6.387.043	20%
41	\$ 35.517	30	25	\$ 1.065.510	\$ 897.745	16%
2	\$ 72.431	234	204	\$ 16.948.921	\$ 14.803.820	13%
43	\$ 59.406	10	9	\$ 594.060	\$ 514.288	13%
413	\$ 59.406	10	9	\$ 594.060	\$ 514.288	13%
50	\$ 105.290	15	13	\$ 1.579.350	\$ 1.381.344	13%
65	\$ 315.535	8	7	\$ 2.524.282	\$ 2.247.702	11%
196	\$ 2.384.669	7	6	\$ 16.692.683	\$ 14.929.191	11%
31	\$ 35.100	44	40	\$ 1.544.400	\$ 1.400.733	9%
46	\$ 31.317	10	9	\$ 313.170	\$ 294.705	6%
63	\$ 49.425	20	19	\$ 988.500	\$ 930.891	6%
47	\$ 107.732	18	17	\$ 1.939.176	\$ 1.832.128	6%
3	\$ 2.958	710	690	\$ 2.100.180	\$ 2.039.883	3%
1	\$ 14.590	684	671	\$ 9.979.842	\$ 9.795.097	2%
10	\$ 2.707	410	405	\$ 1.109.870	\$ 1.096.977	1%
11	\$ 2.243	720	716	\$ 1.446.735	\$ 1.606.437	1%
62	\$ 208.676	10	10	\$ 2.086.760	\$ 2.086.760	0%
			Total	515.864.551	311.133.176	

Fuente: Fuente: Elaboración propia

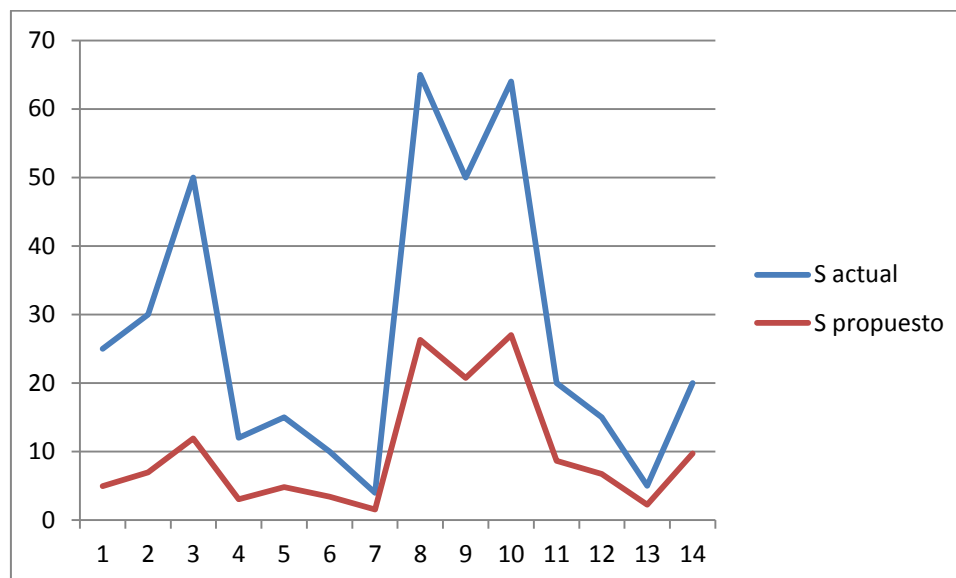
En la comparación se encontró que el 98% de los niveles máximos de los repuestos del sistema actual son superiores al de la propuesta en promedio un 34%, solo el 2% es igual y ninguno es menor. Lo cual sucede porque los parámetros de control actualmente se definen de acuerdo a la experiencia e intuición de las personas que trabajan diariamente con las cosechadoras, pero no se realiza ningún estudio ni análisis de datos, haciendo que se sobre estimen los valores máximos y los inventarios de seguridad a fin de no incurrir en faltantes, lo que aumenta el costo de mantenerlo. En el cuadro No. 24 se presentan algunos casos en donde el inventario máximo actual supera hasta en un 80% al propuesto.

Cuadro 54.Comparación valores máximos sobre estimados

No.	Valor Item	S actual	S propuesto	Valor Inv Actual	Valor Inv Propuesto	Comparación
108	\$ 339.820	25	5	\$ 8.495.508	\$ 1.685.303	80%
44	\$ 1.036.916	30	7	\$ 31.107.490	\$ 7.232.964	77%
32	\$ 90.053	50	12	\$ 4.502.667	\$ 1.072.180	76%
230	\$ 205.746	12	3	\$ 2.468.952	\$ 625.443	75%
163	\$ 364.012	15	5	\$ 5.460.180	\$ 1.750.169	68%
219	\$ 679.000	10	3	\$ 6.790.000	\$ 2.321.627	66%
363	\$ 4.967.712	4	2	\$ 19.870.848	\$ 7.727.560	61%
33	\$ 64.526	65	26	\$ 4.194.190	\$ 1.698.865	59%
84	\$ 20.739	50	21	\$ 1.036.925	\$ 430.753	58%
42	\$ 84.668	64	27	\$ 5.418.752	\$ 2.287.620	58%
61	\$ 146.869	20	9	\$ 2.937.380	\$ 1.269.230	57%
54	\$ 606.450	15	7	\$ 9.096.745	\$ 4.083.176	55%
179	\$ 6.168.362	5	2	\$ 30.841.808	\$ 13.896.309	55%
14	\$ 237.733	20	10	\$ 4.754.657	\$ 2.313.527	51%
342	\$ 10.325.017	6	5	\$ 61.950.102	\$ 47.053.575	24%
308	\$ 12.003.706	3	2	\$ 36.011.118	\$ 18.616.553	48%
320	\$ 1.159.114	3	2	\$ 3.477.342	\$ 1.803.068	48%
367	\$ 10.428.132	3	2	\$ 31.284.396	\$ 16.221.555	48%
380	\$ 1.205.200	3	2	\$ 3.615.600	\$ 1.874.757	48%
398	\$ 13.984.589	3	2	\$ 41.953.767	\$ 21.753.827	48%
95	\$ 282.519	10	5	\$ 2.825.190	\$ 1.472.645	48%
295	\$ 1.350.000	3	2	\$ 4.050.000	\$ 2.158.285	47%
12	\$ 40.462	48	27	\$ 1.942.187	\$ 1.076.568	45%
407	\$ 1.896.586	3	2	\$ 5.689.758	\$ 3.300.097	42%
245	\$ 205.746	5	3	\$ 1.028.730	\$ 605.768	41%
19	\$ 327.507	18	11	\$ 5.895.134	\$ 3.609.405	39%
344	\$ 78.542	6	4	\$ 471.252	\$ 300.335	36%
140	\$ 1.049.957	3	2	\$ 3.149.871	\$ 2.019.498	36%
28	\$ 119.513	17	11	\$ 2.031.723	\$ 1.319.172	35%
412	\$ 119.513	17	11	\$ 2.031.723	\$ 1.319.172	35%
8	\$ 366.506	18	13	\$ 6.597.112	\$ 4.610.419	30%

Fuente: Fuente: Elaboración propia

Figura 10.Comparación valores máximos sobre estimados



Fuente: Fuente: Elaboración propia

8.3. COMPARACIÓN DEL VALOR DE Q

Se comparó el valor de Q y se halló el costo total relevante para cada sistema, encontrando que con la propuesta se reduce el CTR en un 49%, que en dinero representa aproximadamente 16 MM.El cuadro No. 25 presenta la comparación entre el sistema actual y el propuesto.

Cuadro 65.Comparación valores de Q sistema actual vs Propuesto

No.	Q Actual	Q propuesto	CTR Actual	CTR Propuesta
1	434	337	\$ 104.327	\$ 101.070
2	134	113	\$ 189.017	\$ 185.909
3	310	488	\$ 32.008	\$ 28.992
5	211	310	\$ 38.499	\$ 29.808
7	300	247	\$ 9.820	\$ 9.636
8	12	8	\$ 125.790	\$ 126.379
9	290	193	\$ 18.182	\$ 16.742
10	400	611	\$ 29.924	\$ 27.454
11	400	611	\$ 29.924	\$ 27.454
12	21	24	\$ 22.513	\$ 22.152
14	14	6	\$ 56.770	\$ 40.141

19	12	6	\$ 77.518	\$ 59.029
23	12	6	\$ 81.975	\$ 61.257
27	10	10	\$ 70.982	\$ 70.982
28	12	7	\$ 23.487	\$ 20.323
29	17	11	\$ 34.530	\$ 30.484
31	36	35	\$ 24.984	\$ 24.938
32	28	8	\$ 33.315	\$ 16.965
33	33	15	\$ 28.353	\$ 20.607
41	25	17	\$ 13.701	\$ 12.650
42	41	14	\$ 44.442	\$ 25.748
43	9	7	\$ 9.259	\$ 8.880
44	15	2	\$ 467.609	\$ 80.930
45	15	10	\$ 42.045	\$ 44.286
46	9	8	\$ 5.090	\$ 5.021
47	14	9	\$ 25.151	\$ 22.511
48	21	9	\$ 31.935	\$ 22.511
50	11	9	\$ 21.839	\$ 21.045
54	11	3	\$ 152.957	\$ 70.901
61	8	6	\$ 22.156	\$ 20.755
62	4	6	\$ 31.284	\$ 30.598
63	16	14	\$ 14.739	\$ 14.525
65	5	4	\$ 38.304	\$ 36.481
68	3	10	\$ 105.739	\$ 50.474
84	22	18	\$ 8.327	\$ 8.153
94	2	1	\$ 408.530	\$ 232.642
95	4	3	\$ 24.861	\$ 22.981
108	19	3	\$ 109.380	\$ 33.960
113	4	2	\$ 79.452	\$ 59.996
117	4	3	\$ 28.924	\$ 26.225
140	1	1	\$ 42.469	\$ 42.469
163	13	3	\$ 84.125	\$ 34.766
179	3	1	\$ 2.199.857	\$ 757.309
189	2	1	\$ 85.470	\$ 52.870
196	3	3	\$ 477.815	\$ 477.815
201	2	1	\$ 5.621.730	\$ 2.827.081
219	8	2	\$ 127.814	\$ 42.088
230	6	2	\$ 19.021	\$ 11.145
245	3	2	\$ 11.312	\$ 9.794
295	2	1	\$ 99.662	\$ 53.885
308	2	1	\$ 5.535.162	\$ 2.773.662
320	2	1	\$ 34.350	\$ 23.256
342	2	1	\$ 4.228.707	\$ 2.319.027

344	5	3	\$ 6.197	\$ 5.448
363	2	1	\$ 952.887	\$ 482.524
367	2	1	\$ 4.175.307	\$ 2.093.734
380	2	1	\$ 83.597	\$ 47.879
398	2	1	\$ 7.511.304	\$ 3.761.733
407	2	1	\$ 180.436	\$ 96.299
412	12	7	\$ 23.487	\$ 20.323
413	9	7	\$ 9.259	\$ 8.880
414	21	9	\$ 31.935	\$ 22.511

Fuente: elaboración propia

Tal como se comentó anteriormente, los valores altos de Q se generan por las sobre estimaciones de los parámetros de control que se calculan con base a la experiencia y expectativas de las personas que trabajan en el día a día con las cosechadoras.

9. CONCLUSIONES

- Utilizar una técnica multicriterio para la clasificación de los ítems es de vital importancia para identificar correctamente aquellos que tienen un impacto significativo en la problemática y que deben ser tratados con cuidado para solucionarla.
- En la clasificación de los ítems, La criticidad y el lead time obtuvieron un peso de 54% y 20% respectivamente, siendo considerados los criterios con mayor importancia a la hora de clasificar los ítems. Contrario a lo que se hace actualmente en el ingenio donde el único criterio importante es el consumo.
- Dada la variabilidad del comportamiento de los repuestos, debe establecerse un tiempo de actualización de la clasificación ABC a fin de incluir aquellos repuestos que se han vuelto críticos y sacar aquellos que han dejado de serlo.
- Los repuestos normalmente son utilizados para las reparaciones y mantenimientos de los equipos por lo cual su demanda tiende a ser errática. En el proyecto, de los 62 repuestos clasificados como clase A el 18% presentaron demanda no errática y el 82% restante presentaron demanda errática.
- El método de pronóstico que presentó mejores resultados para los repuestos con demanda no errática fue la suavización exponencial doble, pues arrojó menores errores de pronóstico, en el 81% de los repuestos.
- La importancia de las técnicas de pronóstico radica en que brindan información basada en datos, que sirve como entrada para la toma de decisiones en la técnica de control, evitando la subjetividad y sesgo de las personas involucradas en el proceso.
- Es importante que exista un procedimiento riguroso para la recopilación de información que garantice la confiabilidad de los datos y la toma de decisiones acertada.
- El alcance del presente proyecto se enmarco entre los ítems clase A, sin embargo la metodología se puede aplicar también a los ítems clase B y C, dependiendo de las necesidades y expectativas de la compañía que la aplique.
- La técnica de control propuesta fue la técnica de revisión continua (s,S), ya que presentó el menor costo total relevante comparada con la técnica de revisión periódica (R,S)

- Dentro del análisis de las técnicas de control, no se incluyó el costo de faltantes debido a que el ingenio no tenía definida esta métrica y su cálculo implicaba tomar en consideración diversos factores que tampoco estaban definidos. Por lo tanto, se propone como investigaciones futuras tomar en consideración el costo de faltante para evaluar las técnicas de control.
- Controlar los ítems clase A garantiza enfocar los esfuerzos y el dinero en aquellos repuestos que tienen un impacto directo con los paros en las cosechadoras, ayudando así a contar con los repuestos críticos oportunamente de manera que se reduzcan los tiempos de inactividad.
- La propuesta planteada presenta menores costos en los niveles máximos de inventario, con una reducción del 40% y menores costos en el CTR, con una disminución del 49%. Dando así un ahorro total de 216 MM
- Establecer la hoja de vida de los equipos, en donde se tenga el historial de cambio de cada repuesto y estableciendo estadísticas como horas de uso de cada pieza.
- Recomendar incluir en el sistema de gestión de la empresa crear el indicador, tiempo medio entre reparaciones (MTTR) y también el indicador tiempo medio entre fallas (MTBF) empezar por los repuestos clasificados como tipo A.
- Elaborar un programa para establecer los entornos que causan deterioro acelerado en los equipos.

BIBLIOGRAFÍA

ARONIS K. P., MAGOU I., DEKKER R. Tagaras, G..Inventory control of spare parts using a Bayesian approach: a case study. En: EuropeanJournal of OperationalResearch 2004 vol.154 no.3 p., 730–739.

CAKIR Ozan, S. CANBOLAT Mustafa. A web-based decision support system for multi-criteria inventory classification using fuzzy AHP methodology. Expert Systems with Applications. Canada. 35 2008.p. 1367–1378.

COHEN M. A., ERNST, R. Multi-item classification and generic inventory stock control policies. En: Production and Inventory Management Journal, 1988. vol.29 no.3,p. 6–8.

CORTÉS B. E, MORALES L. V. DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE INVENTARIOS DE REPUESTOS EN UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE LA CIUDAD DE CALI. Tesis de grado para optar por el título de ingeniería industrial. Facultad de ingenierías. Universidad del Valle.p.50

CROSTON J. D. Forecasting and stock control for intermittent demands. En:Operational Research Quarterly, 1972. vol.23, p.289–303.

CHUN YU Min. Multi-criteria ABC analysis using artificial-intelligence-based classification techniques.Expert Systems with Applications. Taiwan. 2011 vol. 38 p.3416–3421.

DE LA FUENTE, David. Ingeniería de organización en la empresa: Dirección de operaciones.en línea Disponible [en línea] books.google. [consultado 12 de septiembre de 2012.] Disponible en Internet http://books.google.com.co/books?id=vvkk787HzuUC&pg=PA114&lpg=PA114&dq=gestion+inventarios&source=bl&ots=2WC_aKmnY&sig=0O6x4fS62tNLLxrdcbXg7aDAe4&hl=es&sa=X&ei=TiRRULigCpSK9ATP34HIBQ&ved=0CC8Q6AEwAA#v=onepage&q=gestion%20inventarios&f=false

FLORES B. E., WHYBARK, D. C.. Implementing multiple criteria ABC analysis. En:Journal of Operations Management, vol.7no.1–21987.p 79–85.

GAITHER Norman, FRAZIER Greg. Administración de Producción y Operaciones. Cengage Learning Editores, 2000, p. 82 – 84.

GELDERSL.F., VAN LOOYP.M., An inventory policy for slow and fast movers in a petrochemical plant: a case study. En: Journal of the Operational Research Society 1978. vol.29 no.9, p.867–874.

GHOBBAR, A.A., FRIEND, C.H., Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation: A predictive model. En: Computers and Operations Research 2003. vol30,p.2097–2114.

HANKE John E, WICHERN Dean W. Pronosticos en los Negocios. Pearson Educación, 2006. p. 121 – 122.

JOHNSTON F.R., BOYLAN, J.E., Forecasting intermittent demand: A comparative evaluation of Croston's method.en: International Journal of forecasting 1996. Vol.12,p. 297–298.

KUKREJA A., SCHMIDT C.P., A model for lumpy demand parts in a multi-location inventory system with transshipments. Computers and Operations Research 2005. Vol.32 no.8,p. 2059–2075.

MONTGOMERY, D.C., L.A. Johnson, & J.S. Gardiner Forecasting & Time Series Analysis. 2ª Edición, McGraw-Hill, Inc., New York, 1990. p.381

MUÑOZ, David. Administración de operaciones. Enfoque de administración de procesos de negocios.[en línea] books.google.com [consultado 3 de agosto de 2012] Disponible en Internet: http://books.google.com.co/books?id=edZx_26yf64C&pg=PA154&lpg=PA154&dq=planeacion+inventario&source=bl&ots=ZEYyMJllkr&sig=FL_Qxs_4uiqBmpUY2dFd3wAOiOc&hl=es&sa=X&ei=pNtQUPDLEYKo8gS4r4C4AQ&ved=0CEAQ6AEwAw#v=onepage&q=planeacion%20inventario&f=false consultado 3 de agosto de 2012

NENES George, PANAGIOTIDOU Sofia, TAGARAS George. Inventory management of multiple items with irregular demand: A case study. en: European Journal Of Operation Research. Vol.2. P 313.

OREJUELA CABRERA, J. P., & OSORIO GÓMEZ, J. C. El proceso de análisis jerárquico (ahp) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia et Technica* p., 247-252.

PORRAS E., DEKKER R. An inventory control system for spare parts at a refinery: an empirical comparison of different re-order point methods. *European Journal of Operational Research* 1973. vol. 184 no.1,p. 101–132.

RAMANATHAN Ramakrishnan. ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization. en: *Computers & Operations Research*. 2006 Vol.33 p.695–700

Render Barry. *Principios de Administración de Operaciones*. Pearson Educación, 2004, .250.p

SANI, B., KINGSMAN, B.G., Selecting the best periodic inventory control and demand forecasting methods for low demand items. En: *Journal of the Operational Research Society* 1997. Vol. 48,p. 700–713.

SNYDER Ralph. Forecasting sales of slow and fast moving inventories. *European En: Journal of Operational Research*. 2002 vol.140 p.684–699.

SUBRAMANIAN Nachiappan, RAMANATHAN Ramakrishnan. A review of applications of Analytic Hierarchy EN: *Process in operations management. Int. J. Production Economics*. China. 2012 vol. 138 p.215–241.

SYNTETOS Aris, E. BOYLAN John. The accuracy of intermittent demand estimates. En: *International Journal of Forecasting* 2005.vol.21 p.303– 314.

TEUNTER Ruud, SANI Babangida. On the bias of Croston's forecasting method. *European Journal of Operational Research*. Nigeria. 2009 Vol. 194 p.177–183.

----- . Calculating order-up-to levels for products with intermittent demand. *Int. J. Production Economics*. Nigeria. 2009 vol.18 p.82–86.

VEREECKE A., VERSTRAETEN P., An inventory management model for an inventory consisting of lumpy items, slow movers and fast movers. En:International Journal of Production Economics1994. Vol. 35 no.1-3,p. 379–389.

VIDAL Carlos Julio. Fundamentos de Control y Gestión de Inventarios. ed:Programa Editorial Universidad Del Valle, 2010.

WILLEMAIN T.R., SMART C.N., SHOCKOR J.H., DESAUTELS P.A.,. Forecasting intermittent demand in manufacturing: A comparative evaluation of Croston's method. International Journal of Forecasting 1994 vol.10,p. 529–538.

WU CHU Ching, SHUH LIANG Gin, TSENG LIAO Chien. Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification. EN:Computers & Industrial Engineering. 2008 Taiwan. Vol.55 p.841–851.

ZHOUPeng, FAN Liwei. A note on multi-criteria ABC inventory classification using weighted linear optimization. En: European Journal of Operational Research. 2007 vol. 182 p.1488–1491.

ANEXOS

Anexo A. INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR LA EMPRESA

No.	Costo	Consumo(und/mes)	RotInv	Criticidad	Lead time
1	\$ 14.590	225	4	5	8
2	\$ 72.431	167	6	5	8
3	\$ 2.958	81	4	5	8
4	\$ 36.126	4	5	5	8
5	\$ 2.166	115	1	5	15
6	\$ 2.240	5	1	4	15
7	\$ 1.941	21	1	5	15
8	\$ 366.506	10	13	5	8
9	\$ 2.558	30	1	5	15
10	\$ 2.707	32	1	5	15
11	\$ 2.243	135	1	5	15
12	\$ 40.462	5	9	5	10
13	\$ 5.252	3	1	5	8
14	\$ 237.733	2	6	5	10
15	\$ 933	3	1	3	10
16	\$ 27.383	2	1	4	8
17	\$ 21.644	2	1	4	8
18	\$ 57.090	2	2	4	10

19	\$ 327.507	2	6	5	15
20	\$ 1.406	2	1	4	8
21	\$ 146.068	2	4	4	15
22	\$ 846	2	1	4	15
23	\$ 350.313	2	2	5	15
24	\$ 30.907	1	2	3	15
25	\$ 217.482	1	1	4	8
26	\$ 169.257	1	3	3	15
27	\$ 225.561	6	3	5	15
28	\$ 119.513	1	3	5	15
29	\$ 121.862	2	2	5	15
30	\$ 110.200	1	1	5	8
31	\$ 35.100	7	1	5	15
32	\$ 90.053	1	3	5	15
33	\$ 64.526	2	2	5	15
34	\$ 29.656	1	1	4	15
35	\$ 126.388	1	2	4	15
36	\$ 182.460	1	4	4	15
37	\$ 25.937	1	2	4	15
38	\$ 2.173	1	2	4	15
39	\$ 206.242	1	1	4	15
40	\$ 19.800	1	1	4	15

41	\$ 35.517	2	1	5	15
42	\$ 84.668	3	1	5	30
43	\$ 59.406	1	3	5	15
44	\$ 24.808	2	1	5	15
45	\$ 121.784	19	2	5	15
46	\$ 1.036.916	1	2	5	30
47	\$ 31.317	1	2	5	15
48	\$ 107.732	2	1	5	15
49	\$ 130.100	1	1	4	15
50	\$ 105.290	1	2	5	15
51	\$ 120.959	1	2	4	15
52	\$ 8.577	1	2	5	4
53	\$ 109.072	1	2	4	15
54	\$ 606.450	1	3	5	15
55	\$ 14.013	1	1	5	4
56	\$ 48.559	1	1	5	8
57	\$ 150.356	1	2	4	15
58	\$ 46.855	1	1	4	8
59	\$ 203.205	1	2	4	8
60	\$ 66.090	1	2	5	8
61	\$ 146.869	1	2	5	15
62	\$ 208.676	1	1	5	15

63	\$ 49.425	2	1	5	15
64	\$ 56.819	1	2	5	8
65	\$ 315.535	1	4	5	15
66	\$ 39.553	0	2	5	3
67	\$ 149.676	0	3	5	8
68	\$ 158.094	5	3	5	15
69	\$ 128.133	0	2	5	8
70	\$ 251.412	0	4	4	15
71	\$ 133.999	0	2	5	8
72	\$ 75.667	0	3	5	8
73	\$ 3.146	0	1	5	8
74	\$ 1.658	0	1	5	10
75	\$ 14.076	0	1	5	4
76	\$ 80.799	0	1	5	8
77	\$ 1.589.588	0	3	5	8
78	\$ 1.379.033	0	4	5	8
79	\$ 52.244	0	1	4	15
80	\$ 27.745	0	1	5	8
81	\$ 103.168	0	2	3	8
82	\$ 19.963	0	1	5	8
83	\$ 51.127	0	1	2	8
84	\$ 20.739	1	1	5	15

85	\$ 379.500	0	1	5	8
86	\$ 128.220	0	1	5	8
87	\$ 11.769	0	1	2	4
88	\$ 2.316.990	0	2	3	4
89	\$ 17.000	0	1	3	6
90	\$ 78.544	0	2	1	4
91	\$ 137.927	0	1	3	8
92	\$ 561.695	0	2	3	8
93	\$ 53.650	0	1	3	15
94	\$ 2.935.976	1	1	5	30
95	\$ 282.519	1	1	5	15
96	\$ 106.711	0	1	3	10
97	\$ 1.244.626	0	2	5	8
98	\$ 146.282	0	1	5	8
99	\$ 30.503	0	1	5	8
100	\$ 33.034	0	1	5	8
101	\$ 47.033	0	1	5	4
102	\$ 15.300	0	1	1	8
103	\$ 637.097	0	1	3	15
104	\$ 8.429	0	1	1	8
105	\$ 13.055	0	1	2	4
106	\$ 81.780	0	1	5	8

107	\$ 22.282	0	1	2	15
108	\$ 339.820	1	2	5	15
109	\$ 662.455	0	2	2	8
110	\$ 187.500	0	1	2	8
111	\$ 596.800	0	1	3	4
112	\$ 125.758	0	2	2	4
113	\$ 1.327.947	1	2	5	30
114	\$ 13.987	0	1	2	15
115	\$ 74.908	0	1	3	15
116	\$ 290.921	0	1	2	8
117	\$ 339.358	0	1	5	15
118	\$ 145.452	0	1	1	15
119	\$ 102.288	0	1	1	5
120	\$ 353.660	0	2	3	8
121	\$ 15.616	0	1	1	10
122	\$ 37.000	0	1	1	15
123	\$ 16.448	0	1	1	10
124	\$ 940.000	0	1	5	5
125	\$ 1.381	0	1	4	10
126	\$ 224.237	0	1	5	5
127	\$ 47.200	0	1	4	8
128	\$ 145.252	0	1	1	15

129	\$ 72.000	0	1	1	15
130	\$ 167.265	0	1	3	5
131	\$ 122.309	0	1	1	8
132	\$ 316.960	0	1	1	15
133	\$ 161.253	0	1	1	3
134	\$ 305.641	0	1	5	8
135	\$ 145.734	0	1	3	4
136	\$ 54.667	0	1	1	15
137	\$ 609.931	0	2	3	8
138	\$ 209.648	0	1	3	5
139	\$ 366.286	0	1	3	5
140	\$ 1.049.957	0	1	5	15
141	\$ 213.918	0	1	3	5
142	\$ 133.260	0	1	1	15
143	\$ 33.890	0	1	3	3
144	\$ 904.090	0	1	5	8
145	\$ 92.345	0	1	3	15
146	\$ 360.534	0	1	3	5
147	\$ 194.455	0	1	3	5
148	\$ 198.000	0	1	3	8
149	\$ 11.039	0	1	5	8
150	\$ 618.305	0	1	3	15

151	\$ 1.514.303	0	1	3	8
152	\$ 1.418.753	0	1	3	8
153	\$ 17.374	0	1	1	4
154	\$ 223.800	0	1	5	8
155	\$ 67.597	0	1	3	8
156	\$ 175.841	0	1	3	15
157	\$ 33.496	0	1	3	15
158	\$ 291.212	0	1	1	4
159	\$ 15.000	0	1	5	8
160	\$ 7.635	0	1	1	4
161	\$ 93.400	0	1	1	5
162	\$ 132.210	0	1	3	5
163	\$ 364.012	1	1	5	15
164	\$ 191.642	0	1	1	5
165	\$ 2.221.833	0	1	5	8
166	\$ 211.522	0	1	3	5
167	\$ 157.136	0	1	1	15
168	\$ 316.440	0	1	1	8
169	\$ 107.502	0	1	1	15
170	\$ 120.965	0	1	3	8
171	\$ 294.109	0	1	1	8
172	\$ 54.736	0	1	3	8

173	\$ 88.000	0	1	1	15
174	\$ 273.787	0	1	3	15
175	\$ 2.515.145	0	1	5	8
176	\$ 7.554	0	1	3	5
177	\$ 3.565.815	0	1	5	8
178	\$ 120.000	0	1	1	15
179	\$ 6.168.362	1	1	5	15
180	\$ 63.110	0	1	1	15
181	\$ 164.343	0	1	3	15
182	\$ 21.265	0	1	1	5
183	\$ 231.464	0	1	3	15
184	\$ 1.125.197	0	1	1	15
185	\$ 26.503	0	1	5	6
186	\$ 1.107.361	0	1	3	15
187	\$ 1.186.683	0	1	3	15
188	\$ 515.200	0	1	1	8
189	\$ 1.194.967	0	1	5	15
190	\$ 588.616	0	1	3	30
191	\$ 36.374	0	1	1	4
192	\$ 23.960	0	1	3	15
193	\$ 1.316.114	0	1	3	15
194	\$ 12.000	0	1	3	4

195	\$ 246.485	0	1	3	5
196	\$ 2.384.669	34	1	5	15
197	\$ 701.163	0	1	3	15
198	\$ 514.474	0	1	3	8
199	\$ 1.290.550	0	1	3	15
200	\$ 64.415	0	1	5	15
201	\$ 12.090.000	0	1	5	30
202	\$ 132.992	0	1	3	5
203	\$ 599.231	0	1	3	30
204	\$ 292.500	0	1	4	15
205	\$ 279.000	0	1	3	15
206	\$ 182.436	0	1	3	5
207	\$ 64.817	0	1	3	8
208	\$ 182.712	0	1	3	5
209	\$ 910.119	0	1	3	15
210	\$ 28.497	0	1	3	8
211	\$ 59.426	0	1	5	15
212	\$ 26.871	0	1	3	8
213	\$ 691.274	0	1	3	8
214	\$ 2.777.594	0	1	3	8
215	\$ 302.802	0	1	3	5
216	\$ 2.871.840	0	1	5	8

217	\$ 599.231	0	1	3	30
218	\$ 28.570	0	1	3	15
219	\$ 679.000	0	1	5	15
220	\$ 94.500	0	1	3	8
221	\$ 112.700	0	1	3	15
222	\$ 304.251	0	1	3	15
223	\$ 402.327	0	1	3	15
224	\$ 81.510	0	1	3	8
225	\$ 61.650	0	1	2	5
226	\$ 410.245	0	1	2	8
227	\$ 860.000	0	1	5	10
228	\$ 1.749.667	0	1	2	8
229	\$ 97.971	0	1	2	15
230	\$ 205.746	0	1	5	25
231	\$ 223.000	0	1	2	8
232	\$ 95.166	0	1	2	8
233	\$ 498.930	0	1	2	15
234	\$ 83.012	0	1	2	4
235	\$ 870.000	0	1	2	8
236	\$ 12.981.752	0	1	5	8
237	\$ 2.301.250	0	1	5	8
238	\$ 20.383	0	1	2	6

239	\$ 39.583	0	1	2	8
240	\$ 3.478	0	1	2	4
241	\$ 35.877	0	1	2	15
242	\$ 871.818	0	1	2	15
243	\$ 311.940	0	1	2	8
244	\$ 144.012	0	1	2	15
245	\$ 205.746	0	1	5	25
246	\$ 3.651.016	0	1	5	8
247	\$ 877.712	0	1	5	8
248	\$ 75.548	0	1	5	15
249	\$ 112.000	0	1	5	15
250	\$ 407.652	0	1	5	15
251	\$ 158.466	0	1	2	8
252	\$ 453.543	0	1	2	15
253	\$ 38.805	0	1	2	8
254	\$ 107.000	0	1	5	15
255	\$ 697.070	0	1	2	8
256	\$ 108.922	0	1	2	3
257	\$ 877.445	0	1	5	4
258	\$ 1.547.434	0	1	5	8
259	\$ 60.050	0	1	1	4
260	\$ 1.419.709	0	1	2	15

261	\$ 157.790	0	1	2	8
262	\$ 289.000	0	1	2	15
263	\$ 113.444	0	1	2	15
264	\$ 23.789	0	1	2	8
265	\$ 642.452	0	1	4	8
266	\$ 1.455.400	0	1	2	15
267	\$ 3.422.590	0	1	4	8
268	\$ 3.050	0	1	2	4
269	\$ 69.883	0	1	2	8
270	\$ 11.879	0	1	2	8
271	\$ 486.802	0	1	2	15
272	\$ 750.000	0	1	5	8
273	\$ 642.452	0	1	5	8
274	\$ 10.000	0	1	2	4
275	\$ 66.150	0	1	2	8
276	\$ 84.165	0	1	2	8
277	\$ 25.777	0	1	2	8
278	\$ 31.000	0	1	2	4
279	\$ 888.146	0	1	2	4
280	\$ 91.966	0	1	2	15
281	\$ 1.560.000	0	1	2	8
282	\$ 80.000	0	1	2	8

283	\$ 76.652	0	1	2	8
284	\$ 5.248	0	1	2	6
285	\$ 125.650	0	1	2	8
286	\$ 31.776	0	1	2	6
287	\$ 1.175.421	0	1	2	30
288	\$ 42.254	0	1	2	8
289	\$ 45.116	0	1	2	15
290	\$ 235.000	0	1	2	15
291	\$ 2.092.815	0	1	2	8
292	\$ 20.472	0	1	2	6
293	\$ 204.292	0	1	2	5
294	\$ 50.000	0	1	2	6
295	\$ 1.350.000	0	1	5	25
296	\$ 154.466	0	1	2	8
297	\$ 13.097	0	1	2	8
298	\$ 145.360	0	1	2	8
299	\$ 19.983	0	1	2	8
300	\$ 381.444	0	1	1	15
301	\$ 25.796	0	1	2	8
302	\$ 21.099	0	1	1	8
303	\$ 94.740	0	1	1	4
304	\$ 10.350	0	1	1	4

305	\$ 2.824.755	0	1	2	8
306	\$ 7.333.797	0	1	5	8
307	\$ 118.426	0	1	1	8
308	\$ 12.003.706	0	1	5	15
309	\$ 292.778	0	1	1	8
310	\$ 121.986	0	1	1	3
311	\$ 730.000	0	1	1	5
312	\$ 6.184.363	0	1	5	8
313	\$ 1.650.000	0	1	1	8
314	\$ 1.108.690	0	1	1	8
315	\$ 1.347.399	0	1	1	8
316	\$ 68.544	0	1	1	8
317	\$ 126.000	0	1	1	8
318	\$ 231.448	0	1	5	8
319	\$ 159.879	0	1	1	8
320	\$ 1.159.114	0	1	5	15
321	\$ 1.175.421	0	1	2	30
322	\$ 223.117	0	1	5	8
323	\$ 3.046.056	0	1	5	8
324	\$ 80.172	0	1	2	6
325	\$ 204.900	0	1	1	15
326	\$ 399.000	0	1	1	6

327	\$ 840.488	0	1	1	15
328	\$ 412.466	0	1	1	6
329	\$ 1.236.272	0	1	2	15
330	\$ 16.033.167	0	1	1	6
331	\$ 369.826	0	1	1	6
332	\$ 367.545	0	1	1	15
333	\$ 371.006	0	1	1	6
334	\$ 1.282.875	0	1	1	15
335	\$ 212.147	0	1	1	4
336	\$ 213.342	0	1	1	15
337	\$ 102.569	0	1	1	3
338	\$ 123.802	0	1	1	4
339	\$ 1.346.844	0	1	1	15
340	\$ 238.200	0	1	1	15
341	\$ 102.000	0	1	1	8
342	\$ 10.325.017	13	1	5	15
343	\$ 192.213	0	1	1	8
344	\$ 78.542	0	1	5	30
345	\$ 2.101.919	0	1	5	8
346	\$ 4.183.179	0	1	2	15
347	\$ 150.000	0	1	5	15
348	\$ 522.567	0	1	1	15

349	\$ 78.151.948	0	1	5	8
350	\$ 153.732	0	1	1	15
351	\$ 5.735.498	0	1	1	8
352	\$ 206.040	0	1	1	8
353	\$ 109.125	0	1	1	6
354	\$ 24.626	0	1	1	15
355	\$ 1.764.946	0	1	1	8
356	\$ 4.347.400	0	1	5	8
357	\$ 308.315	0	1	1	8
358	\$ 286.074	0	1	5	8
359	\$ 1.869.942	0	1	1	8
360	\$ 23.361.137	0	1	5	8
361	\$ 100.387	0	1	1	8
362	\$ 494.592	0	1	5	8
363	\$ 4.967.712	0	1	5	15
364	\$ 365.102	0	1	5	8
365	\$ 4.526.275	0	1	1	15
366	\$ 6.347.400	0	1	5	8
367	\$ 10.428.132	0	1	5	15
368	\$ 7.722.373	0	1	5	8
369	\$ 687.148	0	1	5	15
370	\$ 4.383.560	0	1	1	8

371	\$ 25.082	0	1	2	8
372	\$ 807.822	0	1	1	4
373	\$ 2.618.000	0	1	1	4
374	\$ 27.800	0	1	1	10
375	\$ 1.290	0	1	2	4
376	\$ 4.244.113	0	1	5	15
377	\$ 1.705.000	0	1	2	8
378	\$ 2.101.401	0	1	5	8
379	\$ 92.000	0	1	2	4
380	\$ 13.072.316	0	1	5	15
381	\$ 53.838	0	1	2	8
382	\$ 1.412.848	0	1	5	15
383	\$ 4.776.312	0	1	5	15
384	\$ 4.791.305	0	1	5	8
385	\$ 1.205.200	0	1	5	8
386	\$ 513.964	0	1	3	6
387	\$ 77.277	0	1	3	8
388	\$ 1.365.950	0	1	3	8
389	\$ 379.356	0	1	3	15
390	\$ 500.750	0	1	3	15
391	\$ 93.692	0	1	3	15
392	\$ 88.000	0	1	3	15

393	\$ 749.038	0	1	5	8
394	\$ 490.573	0	1	3	8
395	\$ 1.637.524	0	1	5	8
396	\$ 194.141	0	1	3	8
397	\$ 821.964	0	1	5	8
398	\$ 13.984.589	0	1	5	15
399	\$ 933.036	0	1	3	15
400	\$ 296.000	0	1	3	15
401	\$ 1.039.933	0	1	3	8
402	\$ 145.000	0	1	3	8
403	\$ 1.039.933	0	1	3	8
404	\$ 22.300	0	1	3	10
405	\$ 142.179	0	1	3	15
406	\$ 2.250.950	0	1	5	8
407	\$ 1.896.586	0	1	5	25
408	\$ 5.918	0	1	3	4
409	\$ 6.773.852	0	1	5	8
410	\$ 2.067.837	0	1	5	8
411	\$ 17.000	0	1	5	15
412	\$ 206.641	1	1	5	20
413	\$ 126.858	1	1	5	20
414	\$ 2.510.060	2	1	5	30

